

**KRYSTIAN WILK** 

BADANIA DYFUZYJNYCH PALNIKOW GAZOWYCH

# ENERGETYKA

Z. 85 GLIWICE 1984

# P. 3350 84 Staword POLITECHNIKA ŚLĄSKA ZESZYTY NAUKOWE

Nr 785

17. 182N 0.172-3796

folly many plant manager may dissolve the optimized by pressure a

the set is a set of the set of th

a service of a service state of the service of a service of a service of the serv

GLIWICE 1984

1

which the probability which

**KRYSTIAN WILK** 

# BADANIA DYFUZYJNYCH PALNIKÓW GAZOWYCH

#### OPINIODAWCY:

Prof. dr hab. inż. Ryszard Petela Prof. dr hab. inż. Tadeusz Senkara

No 785

#### KOLEGIUM REDAKCYJNE

Wiesław Gabzdyl (redaktor naczelny), Gerard Kosman (redaktor działu), Elżbieta Stinzing (sekretarz redakcji)

## OPRACOWANIE REDAKCYJNE

Alicja Nowacka

Wydano za zgodą . Rektora Politechniki Śląskiej

#### PL ISSN 0372-9796

#### Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej ul. Kujawska 3, 44-100 Gliwice

Skład, fotokopie, druk i oprawę wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Ślaskiej w Gliwicach Str.

RZEDMOVA	5
AZNIBJSZE OZNACZENIA I INDEKSY	7
WPROWADZENIE	11
1.1. Sposoby spalania gazów i ich znaczenie praktyczne	11
1.2. Turbulentne plomienie dyfuzyjne	12
1.3. Parametry substratów spalania	12
1.4. Ocena jakości płomienia	15
1.5. Cel pracy	19
. TEMPERATURA DYFUZYJNEGO PŁOMIENIA GAZOVEGO	21
2.1. Równanie profilu temperatury w plomieniu	21
2.2. Charakterystyczne parametry profilu temperatury w płomie- niu	26
2.3. Uogólniona charakterystyka gazowych płomieni dyfuzyjnych	29
2.3.1. Liczby kryterialne podobieństwa płomieni dyfuzyj- nych	29
2.3.2. Parametry substratów, cechy konstrukcyjne palnika i komory spalania	30
2.3.3. Uogólniona charakterystyka plomieni	31
DOŚWIADCZALNE OKREŚLENIE TEMPERATUROWEJ CHARAKTERYSTYKI DYFUZYJ-	32
2 4. Stepandeko doświedowalna i zakwas badań	34
2.2 Numiki namiawów	37
2.2. Wyman pomietow	21
filu temperatury plomieni	41
3.4. Uogólnienie wyników eksperymentalnych	- 50
CIENA UOGÓLNIONEJ TEMPERATUROWEJ CHARAKTERYSTYKI DYFUZYJNYCH PLONIENI GAZOWYCH	56
4.1. Ocena blędu temperatury płomienia obliczonej na podstawie uogólnionej charakterystyki	56
4.2. Porównanie wyników obliczeń z danymi pomiarowymi	59
4.3. Przykłady wykorzystania modelu dyfuzyjnego płomienia gazo- wego do analizy wpływu parametrów substratów na jakość	~
plomienia	64
4.3.1. Stosumek nadmiaru powietrza do spalania	65
4.3.2. Obciążenie palnika	66
4. 3. 3. Zmiana Daliva gazovego	00

	4.3.5. Udział tlenu w powietrzu do spalania	69
5.	OPTYMALIZACJA DYFUZYJNYCH PALNIKÓW GAZOWYCH O UMIARKOWANYCH PRĘD- KOŚCIACH WYPLYWU SUBSTRATÓW	77.4
	5.1. Określenie optymalnych wartości predkości gazu i powietrza	72
	5.2. Przykłady optymalizacji palników	77
5.	PODSUMOWANIE I WNIOSKI	81
7.	LITERATURA	83
	C/TD D C/7 /17 Datr 4	0,
	SIRESAUARAIR	87
	to be from interior plantation account of the second statement of the	
	Lt.L. Make invitation patentickers signified attack.	
	. Container and and a second statement of the second secon	
	second and a second a	
	interesting interesting interesting interesting in	
	Manual and addresses of the second of the salidant of the	
	concernent distances distances in the second second second second second	
	eterritation allocations and along anniation passenate .rap.#	
	and service the supervise of the state of the second second second second second second second second second se	

stream a Buildin Fraincree Principal Contact or Streams

#### PRZEDMOWA

Niniejsza rozprawa jest podsumowaniem ozternastu lat badań i dociekań autora, dotyczących procesu spalania gazu w turbulentnych płomieniach dyfuzyjnych. Autor uczestniczył prawie od zarania w badaniach spalania,którego początki w naszym kraju datują się na koniec lat sześćdziesiątych i które w tamtym czasie zostały podjęte w Instytucie Techniki Cieplnej Politechniki Śląskiej w Gliwiczch, w zespole kierowanym przez Prof. dr hab. inż. R. Petelę.

Obszerne dane pomiarowe, dotyczące płomieni gazowych, były gromadzone i analizowane podczas badań wykonanych w laboratorium spalania ITC, w laboratorium dawnego ZBiD Biprohut oraz podczas badań palników i pieców grzewozych w hutach żelaza, w ramach 6 prac naukowo-badawozych, 6 magisterskich i 12 inżynierskich prac dyplomowych, które będąc pracami oząstkowymi, zostały przez autora zaplanowane i pod jego kierunkiem zrealizowane jako spójna i dość wyczerpująca całość.

Wyniki pracy były prezentowane na konferencjach krajowych [35, 56, 59] oraz na Międzynarodowych Sympozjach Procesów Spalania [32, 57, 61] organizowanych przez Polską Akademię Nauk zaś ich dwukrotne wdrożenie w przemyśle zostało zakończone uzyskaniem wymiernego efektu w postaci zmniejszenia zużycia paliwa gazowego w hutniczych piecach grzewczych [60].

Vszystkim tym, którzy wykazywali zainteresowanie i nie szczędzili cennych uwag podozas wykonywania niniejszej pracy, a w szczególności Panom Profesorom R. Peteli i J. Szargutowi serdecznie dziękuję.

- E. . Ifaile heritarialas metalations.
  - a stalls, mapflestmath heatery hyplicits, and
- herepaiderer engelt invers springer.
- mine Production, marfalled
- make bit south adding ing for
- Munimust and Adventury, that young performance a plantation,
- item manages,
- link plosterly
- pain. Including over and the contract period in the statement for the second period period and the

- 4 -

Str.

#### WAŻNIEJSZE OZNACZENIA I INDEKSY

#### Litery

A, C, E	- charakterystyczne parametry profilu temperatury płomienia,
	- pole przekroju wylotowego dyszy, pole powierzchni, m <sup>2</sup> ,
s, so	- szybkość i stała szybkości spalania paliwa, a <sup>-1</sup> ,
ъ	- stala,
°,	- stala promieniowania ciala czarnego, W/(m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ),
0	- koncentracja skladnika, kg/m <sup>3</sup> ,
°p	- właściwa pojemność cieplna, J/(kg K),
D	- średnica komory spalania, dyszy palnika, m,
Def	- efektywny współozynnik dyfuzji, m <sup>2</sup> /s,
d	– znak różnioski, średnica,
do	- obarakterystyczny wymiar liniowy (średnica dyszy zastępozej),m.
F, 1	- symbol funkoji,
# j	- gradient,
h	- wysokość słupa cieczy manometrycznej, mm,
İ, 1	- strumień entalpii, entalpia właściwa, W, J/kg,
10	- entalpia właściwa strugi zastępozej, J/kg,
K1, K2	- liozby kryterialne podobieństwa,
. k	- stala, współczynnik komory spalania, m <sup>1/3</sup> ,
L	- dlugcáć plomienia, komory spalania, m,
L	- bezwymiarowa długeść komory spalania,
м	- masa drobinowa, kg/kmol,
+	- masa strumienia, kg/s,
	- stosunek mas strumieni, ilość punktów pomiarowych w płomieniu,
Nu	- liozba Nusselta,
	- ilość płomieni,

"a min	-	teoretyczne zapotrzebowanie powietrza do spalenia jednostki pa-
		liwa, kmol pow./kmol paliwa,

And the Alexandrian of the second sec

.

tent borge, Anten estendations months of memory of antenname and antenname and antenname and antenname and an  antenname and and antenname and and antenname an antenname anten

Provinces has particular distributed produced province produces and a second of a second seco

[12, bt [2], bt [2], and an and and and an endowed an analysis of the second state of

Verprists the, titled examination extratationals is the encipable and their over perfects extrapolatic statepates press, a v. manythaski. These Profession E. Petrili I J. Barquined contained interaction.

12.00

- 9 -

- ilość spalin wilgotnych na jednostkę paliwa, kmol sp. w. /kmol paliwa,

- 8 -

- strumień spalin, kmol/s. ń,
- ilość paliwa, m2, kg, P
- liozba Prandtla. Pr

n"

- ciśnienie, ciśnienie manometryczne, hPa, P, P\_

- ġ. - strumień ciepła, V.
- współrzędna liniowa, stała gazowa, m, J/(kg K), R
- R# - bezwymiarowa współrzędna liniowa,
- liosba Reynoldsa, Re
- promień, współezynnik korelacji, T.
- So - liozba Sohmidta.
- temperatura, K. °C. T. t
- strumień objętości czynnika, m<sup>3</sup>/s, Ŷ
- wartość opalowa, J/kg. W<sub>d</sub>
- prędkość, stosunek prędkości, m/s. w
- prędkość wypływu strugi zastępozej, m/s, w<sub>o</sub>
- X. - parametr charakterystyczny profilu temperatury w płomieniu,
- œ - kąt, współosynnik wnikania ciepła,
- $\alpha_{\rm L}, \alpha_{\rm m}$  konwekcyjny i radiacyjny współczynnik wnikania ciepła, W/(m<sup>2</sup>K),
  - kat.

A

Δ

б

P

- przyrost, błąd bezwzględny wielkości,
- błąd względny wielkości,
- 8 - emisy jność,
- kąt, wilgotność względna, φ
- 2 - stosunek nadmiaru powietrza,
- 2,' - stosynek nadmiaru powietrza w mieszance palnej.
- € - zredukowana temperatura,
- współozynnik przewodzenia ciepła, W/(mK), A.
- kinematyozny współozynnik lepkości, m<sup>2</sup>/s. 2
- efektywny współczynnik lepkości strugi zastępozej, kg/(ms), 2 of O

factories approximated -

- sprawność termiozna, 2 + - gestość, kg/m<sup>3</sup>.

- gęstość strugi zastępozej, kg/m<sup>3</sup>,
- ч. - 0288. 8.
- wskaźnik oszczędności paliwa. ω

#### Indeksy dotyczą

- 0 - stanu odniesienia.
- powietrza,
- ozęści chemicznej. oh
- ozęści fizycznej. £
- paliwa gazowego,
- i-tego punktu pomiarowego, i-tego plomienia.
- j-tego parametru charakterystycznego. 4
- k - spalin kalorymetrycznych.
- n - warunków normalnych.
- otoczenia, ot
- substratów spalania, 72
- spoiny termopary. 8
- spalin, 80
- ogrzewanego materiału.
- ścian komory spalania.

a light contain philasteric verter , surveying a proof of the The strength of the second sec involupe weaters and at - a high manifestion - stating limb .

#### 1. WPROWADZENIE

#### 1.1. Sposoby spalania gazów i ich znaczenie praktyczne

Izobaryozne spalanie paliw gazowych realizowane za pomocą palników dzieli się ze względu na zjawisko decydujące o szybkości procesu oraz ze względu na charakter przepływu.

Tak więc wyróżnia się:

- spalanie kinetyczne, zachodzące w przypadku doprowadzenia do komory spalania gotowej mieszanki paliwa z utleniaczem ( $\lambda' \ge 1$ ), o szybkości spalania decyduje kinetyka reakcji chemicznych,
- spalanie dyfuzyjne ( $\lambda' \pm 0$ ), zaohodzące w przypadku oddzielnego doprowadzenia substratów do komory spalania, o szybkości spalania decyduje intensywność mieszania substratów (dyfuzja) po opuszczeniu palnika,
- spalanie kinetyozno-dyfuzyjne, zachodzące w przypadku oddzielnego doprowadzenia do komory spalania bogatej mieszanki paliwa z utleniaczem  $(\lambda' < 1)$  oraz reszty utleniacza.

Każdy z wymienionych sposobów spalania może zachodzić w przepływie laminarnym lub turbulentnym. Spalanie kinetyczne pozwala osiagnać wyższe wartości temperatury w płomieniu w porównamiu z dyfuzyjnym spalaniem takiego samego strumienia paliwa w odpowiednich warunkach. W zastosowaniach praktycznych płomień jest źródłem ciepła i spalin, które również przekazuja energie cialom ogrzewanym w piecu. Efektywność źródła ciepła jest tym wyższa im wyższa jest jego temperatura, Wynika stąd, że z termodynamicznego punktu widzenia należałoby paliwa gazowe spalać w płomieniach kinetycznych. Ze względu jednak na małą stabilność płomienia spalanie kinetyczne nie jest praktycznie stosowane. Spalanie kinetyczno-dyfuzyjne paliw gazowych jest rozpowszechnione w gospodarce komunalnej, gdzie stosowane są palniki o bardzo małej mocy oraz ma ograniczone zastosowanie w przemyśle, w przypadku spalania gazów o dużej wartości opalowej. W przemyśle, gdzie stosuje się palniki 'o średniej i dużej mocy, powszechnie stosuje się turbulentne stalanie dyfuzyjne paliw gazowych, głównie ze względu na wymagana duża intensywność przepływu ciepła oraz wieksze bezpieczaństwo ich działania.

aline heatinhalish singulh alteratives at , i antichers pasiates measure mentione alabaphete to permit a shareagenetic but setained provinces and the planets pairs and an anticher antichers

#### 1.2. Turbulentne plomienie dyfuzyjne

Stosunkowo bogata jest literatura dotycząca swobodnych płomieni dyfuzyjnych [1, 6, 24, 28, 71] oraz poszczególnych zjawisk w płomieniach tych występujących, np. [4, 7, 8, 15, 16, 20, 22, 25, 43, 52, 55]. W latach siedemdziesiątych dużego rozmachu nabrały eksperymentalne badania struktury pól temperatury i koncentracji składników chemicznych w płomieniach przemysłowych [9, 44, 47, 48] prowadzone intensywnie między innymi w Instytucie Techniki Cieplnej Politechniki Śląskiej [29, 30, 39,40,41,42,63,64, 67, 68, 69, 70]. Równolegie rozwija się modelowanie numeryczne gazowych płomieni przemysłowych [5, 17, 19, 22, 23] w największym stopniu [53] oparte na pracy zespołu Spaldinga [14].

Podejmowano również próby opisu temperatury w płomieniu w funkcji czasu [18, 45], temperatury maksymalnej jako funkcji niektórych warunków brzegowych [54] oraz określono bezwymiarowe równanie profilu temperatury w turbulentnych płomieniach kinetycznych [46]. W monografiach poświęconych spalaniu, np. [6, 10, 13, 24, 28, 53, 71] informacje o najbardziej rozpowszechnionych w przemyśle turbulentnych płomieniach dyfuzyjnych zajmują mało miejsca, co świadczy w pewnym stopniu o skrownym zasobie danych na ten temat, jakimi nauka dysponuje.

Rozwój rozwiązań konstrukcyjnych gazowych palników przemysłowych [2,3] wykazuje tendencję do podwyższania średniej temperatury płomienia poprzez intensyfikację procesu dyfuzji turbulentnej substratów po opuszczeniu palnika. Intensyfikację dyfuzji osiąga się poprzez zastosowanie różnych form wylotów palników [43] lub dzięki bardzo silnemu zawirowaniu strugi powietrza [12, 53], które pozwala uzyskać tzw. płomienie płaskie.Zwykle doskonalenie palników odbywa się w laboratoriach producentów metodą doświadozalną, nie została bowiem do tej pory opracowana efektywna metodyka projektowania gazowych palników dyfuzyjnych lub obliczania własności płomieni uzyskanych za pomocą takich palników.

#### 1.3. Parametry substratów spalamia

Spośród parametrów substratów, których wpływ na jakość spalania dyfuzyjnego określonego paliwa gazowego nie ulega wątpliwości, można wymienić następujące:

- stosunek nadmiaru powietrza,
- prędkości strug gazu i powietrza przy wypływie z palnika,
- stopień zawirowania strugi powietrza,
- kąt, pod którym strugi spotykają się.

Stosunek nadmiaru powietrza &, na podstawie długich doświadczeń praktycznych, powiniem być nieznacznie większy od jedności, zwykle wystarczy gdy jest on zawarty w granicach 1,05±1,2. Uzyskanie spalania zupełnego i całkowitego powiniem zapewnić właściwy dobór pozostałych parametrów.W specjalnych przypadkach, gdy np. żąda się aby atmosfera w piecu nie miała charakteru utleniającego lub też by ilość utlenionego produktu nie była duża, wówczas analiza ekonomiczna straty wylotowej chemicznej i straty utlenianego produktu powinna wskazać optymalną wartość stosunku nadmiaru powietrza [50].

Badania laboratory jne palników wirowych typu Biprohut prowadzone przez Instytut Techniki Cieplnej wykazały, że prędkości wypływu gazu i powietrza z palnika wpływają na rozkład temperatury i gęstości egzergii fizycznej płomienia [29, 30, 31, 33, 56, 58]. Podobne wnioski wynikają z badań przedstawionych w pracy [44]. Wpływ prędkości gazu na jakość procesu spalania i nagrzewania wsadu w piecach grzewczych, wyposażonych w większą ilość palników, oceniano za pomocą wskaźnika jednostkowego zużycia energii chemicznej paliwa. Na rysunku 1 przedstawiono wyniki badań prowadzonych w piecach, zasilanych różnymi paliwami gazowymi [39, 40, 41, 62]. Podano tu zależność wskaźnika  $\omega$  oszczędności paliwa, określonego dalej wzorem (3) i ocenionego na podstawie wskaźnika jednostkowego zużycia paliwa, od stopnia otwarcia dyszy gazowej  $A_g/A_g$  max w palnikach, w których możliwa jest regulacja pola przekroju wylotowego dyszy gazowej (stosunek  $A_g/A_g$  max





powiada, przy stałym obciążeniu palnika, stosunkowi w min/w prędkości wypływu gazu z dyszy).

- 14 -

Przedstawione wyniki wskazują, że optymalizacja prędkości wypływu gazu i powietrza z palnika może spowodować zmniejszenie zużycia paliw gazowych w piecach grzewozych nawet o 20%.



Stopień zavirovania strugi powietrza również wpływa na proces dyfuzji turbulentnej, a przez to na temperature plomienia.W grupie palników z umiarkowanym<sup>x)</sup> zawirowaniem [11] stosuje sie zawirowywacze lopatkowe.Wyniki badań [63] temperatury plomieni gazowych uzyakanych przy różnych wartościach kata A pochylenia lopatek zawirowywacza, w zakresie /3 = = 0;60°, posluzyly do opracowania termodynamicznej oceny [57. 58] wpływu zawirowania na plomień. Ze wzgle. du na to, te zwiekszenie zawirowania wymaga zapewnie-



nia wyższego ciśnienia powietrza przed palnikiem, jako kryterium oceny zastosowano stosunek przyrostu  $\Delta k_{\rm b}$  gęstości egzergii fizycznej płomienia do przyrostu  $\Delta k_{\rm bs}$  gęstości egzergii fizycznej substratów, przy czym przyrosty obliczano względem płomienia niezawirowanego. Wyniki analizy przedstawione na rysunku 2 wykazały, że istnieje optymalna, ze względu na przyjęte kryterium, wartość kąta  $\beta = 20^{\circ}$  pochylenia żopatek zawirowywacza. Wartości kąta stosowane w palnikach [11, 12] są zawarte w przedziale  $\beta =$  $= 20-25^{\circ}$ .

W większości stosowanych w kraju gazowych palników dyfuzyjnych [11, 12] struga powietrza wypływająca z palnika zderza się pod kątem  $\alpha = 20^{\circ}$  ze strugą gazu. W literaturze nie spotkano informacji o badaniach wpływu kąta  $\alpha$  na płomień. Jest prawdopodobne, że wieloletnie doświadczenie projektantów pozwoliło tutaj, podobnie jak w przypadku kąta zawirowania trafić na optymalna wartość.

<sup>1</sup>Zawirowanie strugi określa się za pomocą stopnia zawirowania [28], który w praktyce przyjmuje wartości w przedziale 0,2÷5 [37]. W omawianych palnikach stopień zawirowania nie przekracza na ogóż wartości 0,5.

#### 1.4. Ocena jakości płomieni

Do oceny jakości spalania w przemysłowych piecach grzewczych stosuje się sprawność termiczną pieca oraz wskaźnik jednostkowego zużycia energii obemicznej paliwa, który w badaniach porównawczych służy do określenia wskaźnika  $\omega$  oszozędności paliwa [50]. Prowadzenie obszernych badań nad wpływem parametrów substratów i osob konstrukcyjnych palników bezpośrednio w piecach przemysłowych nie jest na ogóż możliwe i zwykle badania takie wykonuje się w laboratoriach, wykorzystując doświadczalne komory spalania. W waruskach laboratoryjnych z kolei wymienione kryteria oceny jakości spalania nie mogą być stosowane. Dla sformułowania kryterium oceny jakości płomieni, realizewanych w doświadczalnych komorach spalania, przeprowadzono analizę wskaźnika  $\omega$  oszozędności paliwa. Rozważano, w stanie ustalonym, komore piece grzewczego (rys. 3), wyschioną gazem grzej-





nym (płomień + spaliny) e śródniej temperaturze  $\overline{T}$ , w której ogrzewany jest materiał (wsad) o średniej w przestrzeni temperaturze powierzchni  $T_{u}$ . Komora zasilana jest paliwem gazowym o stałej wartości opałowej  $W_{d}$  przy stałej wartości stosunku  $\lambda$  nadmiaru powietrza. Spaliny opuszczające komorę pieca mają temperaturę  $\overline{T}$ . Dla określemia wskaźnika  $\omega$  oszozędności paliwa perównane dwa stany działania pieca różniące się jednak w spesób nieznaczny wartością średniej temperatury gazu grzejnego  $\overline{T} = T_{1}$  w stanie odniesienia i  $\overline{T}$  w stanie porównywanym. Założono, że w porównywanych stanach osiagniete jednakowy efekt użyteczny

$$u_0 = E_u$$
(1)

oczywiście przy różnej intensywności ogrzewania wsadu  $\hat{Q}_{u}$ , co sprawiło, że czas 7 potrzebny do osiągnięcia efektu E był różny. Można więc efekt użyteczny wyrazić następująco:

1 16

- 15 -

- 17 -

- dla stanu odniesienia:

$$(E_{u})_{0} = (Q_{u})_{0} \cdot \tau_{0}$$

(2)

Całkowy wskaźnik w oszczędności energii chemicznej paliwa określa się wzorem [50]:

- dla stanu porównywanego: E = Q . C

- 16 -

$$\omega = \frac{(PW_d)_0 - PW_d}{(PW_d)_0}$$
(3)

Ilość zużytej energii paliwa  $(PW_d)_0$  w stanie odniesienia i  $PW_d$  w stanie porównywanym można określić z bilansu energii pieca, sporządzonego dla okreśu czasu niezbędnego do uzyskania efektu użytecznego  $(E_{\mu} = (E_{\mu})_0)$ :

Podstawiając czasy  $t_0$  i t z równań (2) odpowiednio do równań (4), a następnie wielkości (PW<sub>d</sub>)<sub>0</sub> i PW<sub>d</sub> do równania (3) uzyskuje się po przekształceniach wyrażenie:

$$\omega = \frac{\frac{(\dot{q}_{ot})_{0}}{(\dot{q}_{u})_{0}} \left[1 - \frac{\dot{q}_{ot}}{(\dot{q}_{ot})_{0}} + \frac{(\dot{q}_{u})_{0}}{\dot{q}_{u}}\right] + \frac{(\dot{1}_{sp})_{0}}{(\dot{q}_{u})_{0}} \left[1 - \frac{\dot{1}_{sp}}{(\dot{1}_{sp})_{0}} + \frac{(\dot{q}_{u})_{0}}{\dot{q}_{u}}\right]}{(\dot{1} + \frac{(\dot{q}_{ot})_{0}}{(\dot{q}_{u})_{0}} + \frac{(\dot{1}_{sp})_{0}}{(\dot{q}_{u})_{0}}}$$
(5)

którego forma sugeruje dokonanie pewnych uproszczeń.

Strumienie  $(Q_u)_0$  i  $Q_u$  ciepła użytecznego pochłanianego przez wsad o powierzohni  $u = (A_u)_0$  można określić wykorzystując zastępezy współczynnik  $\alpha_z$  wnikania ciepła (uwzględniający promieniowanie i konwekcję):

$$\begin{pmatrix} (\dot{q}_{u})_{0} = \alpha_{z0} \cdot A_{u} \cdot (T_{1} - T_{u}) \\ \dot{q}_{u} = \alpha_{z} \cdot A_{u} \cdot (\overline{T} - T_{u})$$
 (6)

Strumienie  $(\dot{q}_{ot})_0$  i  $\dot{q}_{ot}$  ciepla, odpływającego do otouzenia przez ściany pieca o powierzchni A, wynoszą odpowiednic:

$$\begin{pmatrix} \dot{q}_{ot} \end{pmatrix}_{o} = k_{o} \cdot A \cdot (T_{1} - T_{ot})$$

$$\dot{\dot{q}}_{ot} = k \cdot A \cdot (\overline{T} - T_{ot})$$

$$(7)$$

zaś strumienie entalpii spalin, opuszczających komorę pieca grzewczego w porównywanych stanach działania pieca:

$$(\dot{\mathbf{I}}_{sp})_{0} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{n}}_{s} \cdot (\overline{Mo_{p}}) \end{bmatrix}_{0} \cdot (\mathbf{T}_{1} - \mathbf{T}_{ot})$$

$$\dot{\mathbf{I}}_{sp} = \dot{\mathbf{n}}_{s} \cdot (\overline{Mo_{p}}) \cdot (\overline{\mathbf{T}} - \mathbf{T}_{ot})$$

$$(8)$$

Jeżeli temperatury T<sub>1</sub> i T w porównywanych stanach działania piece grzewozego różnią się nieznacznie, to można przyjąć, że współczynniki wnikania C i przenikania k ciepła oraz strumienie pojemności ciepłnych spalin  $\dot{n}_{a}$ . (Mo<sub>2</sub>) są odpowiednio równe:

$$\alpha_{z0} = \alpha_{z}, \quad k_{0} = k, \quad \left[ n_{s} \cdot (\overline{M}\sigma_{p}) \right]_{0} = n_{s}(\overline{M}\sigma_{p}) \quad (9)$$

Wykorzystując określenia (6), (7), (8) oraz załeżenia (9) można wyrażenie (5) przekształcić do postaci:

$$\omega = (1 - \gamma_{t\bar{t}}) - \frac{T_{u} - T_{c}}{T_{1} - T_{c}} - \frac{\overline{T} - T_{u} - (T_{t} - T_{u})}{\overline{T} - T_{u}}, \quad (10)$$

dsie:

$$= 1 - \frac{(\dot{Q}_{ot})_{0} + (\dot{I}_{ab})_{0}}{(\dot{Q}_{u})_{0} + (\dot{Q}_{ot})_{0} + (\dot{I}_{ab})_{0}}$$
(11)

jest sprawnością termiczną pieca grzewczego w stanie odniesienia.

21

Z analizy wzoru (10) wynika, że dla temperatury  $\overline{T} \ge T_1$  wskaźnik  $\omega \ge 0$ i dla  $\overline{T} < T_1$  wskaźnik  $\omega < 0$ . Wskaźnik  $\omega$  jako funkoja nadwyżki temperatury  $\overline{T} - T_u$  rośnie monotonicznie w miarę wzrostu wartości  $\overline{T} - T_u$ . Nejwiększe przyrosty wartości wskaźnika  $\omega$  uzyskuje się dla małych różnic  $\overline{T} - T_u > 0$ .

Podobnie jak wyżej można ocenić wpływ średniej temperatury T płynu grzejnego na sprawność termiczną 7, pieca grzewczego.Po wykonaniu przekształceń otrzymuje się:

$$\gamma_{t} = \gamma_{t0} \frac{(T_{1} - T_{0t})(\bar{T} - T_{u})}{(\bar{T} - T_{1})(T_{u} - T_{0t})\gamma_{t0} + (\bar{T} - T_{0t})(T_{1} - T_{u})}$$
(12)

łatwo stwierdzić, że w opisanych warunkach pomiędzy wskaźnikiem  $\omega$  a sprawnością termiczną  $\eta_{\pm}$ , porównywanych stanów działania pisca grzewczego, istnieje prosty związek:

$$\omega = \frac{?_t - ?_{t0}}{?_t} \tag{13}$$

Dla uzyskania ilościowej oceny wpływu średniej temperatury  $\overline{T}$  gazów w piecu na wskaźnik  $\omega$  oszczędności paliwa oraz sprawność termiczną  $\eta_t$  pieca grzewczego epracowano następujący przykład.

W piecu grzewczym przepychowym gazy mają średnią temperaturę  $T_1 = 1500$  K, zaś egrzewany wsad ma średnią temperaturę  $T_0 = 1100$  K (455°C przy wejściu i 1 00°C przy wyjściu z pieca), temperatura otoczenia wynosi  $T_{ot} = 300$  K. Obliczenia wartości wskaźnika  $\omega$  i sprawności wykonano dla średniej temperatury T, przyjmującej wartości w przedziale 1500-1600K odpowiednio wg wzorów (10) 1 (12). Obliczenia przeprowadzono dla trzech różmych stanów odniesiamia, obarakterystycznych wartościami sprawności zależności wskaźnika  $\omega$  oszczędności paliwa oraz przyrostu T = 700 sprawności termicznej pieca ed przyrostu T = 700 średniej temperatury gazów w piecu. Widoczne jest, że oszczędność paliwa jest tym większa im niższa jest sprawność 700 pieca w stanie odniesienia. Można też ocenić,że podwytezenie średniej temperatury gazów w piecu o  $T = T_1 = 100$  K pociąga za sobą mocści sprawności 700 pieca. Ocena powyższa wykazuje dobrą zgod-





ność z wynikami przytoczonymi w punkcie 1.3. Widać również, że określonej wyżej oszczędności paliwa & odpowiada wzrost sprawności termicznej 7; 7;0 pieca tylko o 1;3%. Analizując błąd bezwzględny wyznaczenia sprawności termicznej na podstawie wyników pomiarów pieca grzewczego można ocenić, że zazwyczaj przekracza on 2%. Decydujący wpływ na to mają dość duże błędy towarzyszące pomiarom strumienia i temperatur ogrzewanego wsadu. Tak więc można wnioskować, że sprawność termiczna jest wielkością za mało czułą, aby stosować ją do oceny wpływu parametrów substratów i cech konstrukcyjnych palników na działanie pieca grzewczego. Istnieje po prostu obawa, że uzyskane efekty, np. przedsięwzięć optymalizacyjnych mogą być tego samego rzędu co błąd bezwzględny sprawności termicznej i mogą pozostać nie zauważone.

- 19 -

Z przeprowadzonej analizy wynika, że jako kryterium oceny jakości spalania w warunkach laboratoryjnych może służyć średnia temperatura płomieni, stosunkowo łatwa do pomiarowego określenia. Równocześnie, w przypadku badań porównawczych, wielkość ta za pomocą wzoru (10), może być wykorzystana do oceny przewidywanych efektów praktycznych przedsięwzięć, polegających na doskonaleniu wartości parametrów substratów lub cech konstrukcyjnych palników.

Z powyższych rozważań wynika również, że w każdych warunkach płomień należy tak organizować, by uzyskać możliwie najwyższą wartość nadwyżki jego średniej temperatury T ponad temperaturę wsadu T<sub>u</sub> lub śolan komory spalania T<sub>w</sub> (w laboratorium bez wsadu).Celowym zagadnieniem jest więc podjęcie próby określenia ogólnej zależności (modelu płomienia) temperatury płomienia od parametrów substratów i cech konstrukcyjnych palaika.Zależność taką można by wykorzystać do optymalizacji istniejących i projektowania nowych palników w zakresie praktycznym oraz do analizowania wpływu poszczególnych parametrów substratów na własności płomienia, co stanowiłoby jej charakter naukowo-poznawczy.

#### 1.5. Cel pracy

Celem niniejszej pracy jest teoretyczno-doświadczalne opracowanie modelu dyfuzyjnych płomieni gazowych, opartego na ich uogólnionej charakterystyce temperaturowej. Model powinien; w zakresie naukowo-poznawczym,służyć do numerycznych badań własności płomieni realizowanych w różnych warunkach brzegowych. W praktycznym zakresie model powinien umożliwić optymalizację istniejących i racjonalne projektowanie nowych przemysłowych palników gazowych.

Cel postawiony w pracy osiągnięto poprzez wyprowadzenie bezwymiarowego równania profilu temperatury płomienia, w którym wyodrębniono pewne charakterystyczne parametry. Następnie zorganizowano i wykonano badania eksperymentalne, w trakcie których, zmierzono między innymi profile tempera-

- 18 -

tury wzdłuż osi płomieni, do których dopasowywano numerycznie wyprowadzone wcześniej równanie, wyznaczając przy tym wartości parametrów charakterystycznych każdego płomienia. Dokonane potem uogólnienie parametrów charakterystycznych w postaci zależności od liczb kryterialnych podobieństwa, opisujących warunki brzegowe, stanowi wraz z równaniem profilu temperatury model płomienia. Z kolei przeprowadzono krytyczną ocenę modelu, podano przykłady numerycznej analizy płomieni oraz opracowano podstawy optymalizacji i projektowania dyfuzyjnych gazowych palników przemysłowych.

- 20 -

and below in the second of the local of the second of the

Tall TALL P.

All' along's interval, and a single or a subsidial of the subsidial statement of a parameter and a subsidial statement of a subsidia statement of a subsidial statement of

2. TEMPERATURA DYFUZYJNEGO PLOMIENIA GAZOWEGO

W rozdziale tym określono teoretycznie równanie profilu temperatury płomienia, wyodrębniono i przedyskutowano charakterystyczne parametry tego równania oraz zaproponowano metodę uogólnienia parametrów charakterystycznych za pomocą liczb kryterialnych podobieństwa.

#### 2.1. Równanie profilu temperatury w plomieniu

W ustalonym osiowo-symetrycznym płomieniu (rys. 5a) w kierunku tworzącym z osią palnika kąt w, w punkcie określonym współrzędną R, mierzo-



Rys. 5. Schemat komory spalania (a) oraz elementu plomienia (b)

ną od wylotu palnika, sporządzono bilans energii dla elementarnej objętości (rys. 5b), której kształt przyjęto w postaci stożka ściętego o małym kącie rozwarcia (obszaru płomienia nie da się całkowicie wypełnić elementami stożkowymi, jednak jest to nie istotne bowiem dla przeprowadzanych rozważań wystarczy obrać pewien kryterialny kierunek i rozważać symetryczne wokół niego otoczenie):

$$d\mathring{I}_{R} = d\mathring{I}_{R+dR} + d\mathring{I}_{D} + d\mathring{Q}_{2} + d\mathring{Q}_{r}$$
(14)

W bilansie energii uwzględniono następujące składniki:

41

- strumienie pełnej (fizycznej i chemicznej) entalpii przepływającego czynnika

- 22 -

$$d\hat{\mathbf{I}}_{R} = \pi r^{2} w \rho (\mathbf{i}_{oh} + \mathbf{i}_{f})_{R}$$

$$(15)$$

$$R_{AdP} = \pi r^{2} w_{A} \rho_{A} (\mathbf{i}_{oh} + \mathbf{i}_{f})_{PADP}$$

- strumień dyfuzyjny<sup>x</sup>)

$$d\mathbf{I}_{D} = \pi (\mathbf{r} + \mathbf{r}_{1}) dR (-D_{\text{of}} \frac{\partial c}{\partial \mathbf{r}}) (\mathbf{i}_{ch} + \mathbf{i}_{f})_{R+dR}$$
(16)

- strumień ciepła przewodzenia

$$\mathbf{R}_{\mathbf{A}} = \pi (\mathbf{r} + \mathbf{r}_{1}) d\mathbf{R} (-\mathbf{A}_{\mathbf{q}} \cdot \frac{\partial \mathbf{t}}{\partial \mathbf{r}})$$
(17)

- radiacyjny strumień ciepła

$$dQ_{r} = (1 + g)\mathcal{X}(r + r) dR_{0'r}(t - t_{w}), \qquad (18)$$

gdzie t jest średnią temperaturą wewnętrznej powierzchni ścian komory spalania, zaś za pomoca 7 oznaczono stosunek pół powierzchni den do pola powierzchni pobooznicy rozważanego stożkowego elementu płomienia. W równaniu bilansu energii poministo przepływ ciepła przez promienkowanie pomiędzy gazami, przewodzenie i dyfuzje wzdłuż kierunku R oraz energie kinetyczna pulsacji turbulentnych i uśrednionego ruchu strugi ze wzgledu na male wartości tych składników spowodowane małymi gradientami bodźców pomijanych zjawisk.

Strumiań dyfundującego czynnika meżna wyznaczyć z bilansu substancji;

$$\pi \mathbf{I} \mathbf{r}^{2} \mathbf{w} \rho = \pi (\mathbf{r} + \mathbf{r}_{1}) d\mathbf{R} (-\mathbf{D}_{ef} \frac{\partial \mathbf{o}}{\partial \mathbf{r}}) + \pi \mathbf{I} \mathbf{r}_{1}^{2} \mathbf{w}_{1} \rho_{1}$$
(19)

Podstawiając (19) do (16), a następnie wyrażenia (15), (16),(17) i (18) do równania bilansu energii (14) oraz przyjmując, że  $r_{+} = r(R + dR)/R$ , otrzymuje się, przy założeniu R + dR S R, bilans energii elementu płomienia w postaci

x) Dotyczy energii strumienia czynnika przepływającego na skutek dyfuzji turbulentnej przez boczną ściankę rozważanego elementu płomienia. Zastosowana forma zapisu jest przyjęta w teerii spalania.

$$\pi r^{2} w \rho \left[ (\mathbf{i}_{ch} + \mathbf{i}_{f})_{R} - (\mathbf{i}_{eh} + \mathbf{i}_{f})_{R+dR} \right] =$$

$$= 2\pi r dR \left[ -\lambda_{q} \frac{\partial t}{\partial r} + (1 + \gamma) \alpha_{r} (t - t_{w}) \right], \qquad (20)$$

przy czym należy zwrócić uwagę, że dla r/R -- 0 wartość stosunku g -- 1. Przyjmując dalej, że

- 22 -

$$(\mathbf{i}_{ch} + \mathbf{i}_{f})_{R+dR} = (\mathbf{i}_{ch} + \mathbf{i}_{f})_{R} + d\mathbf{i}_{ch} + d\mathbf{i}_{f}$$
(21)

można równanie (20) przekształcić do postaci

$$- di_{oh} - di_{f} = \frac{2}{w \rho r} \left[ - \lambda_{q} \frac{\partial t}{\partial r} + 2\alpha_{r} (t - t_{w}) \right] dR,$$

którą do dalszych rozważań dogodniej jest pomnożyć przez masę drobinową M gazów płomieniowych i podzielić przez pewien charakterystyczny wymiar liniowy do:

$$- d(Mi)_{oh} - d(Mi)_{f} = \frac{2Md_{0}}{w \rho r} \left[ - \lambda_{q} \frac{\partial t}{\partial r} + 2\alpha_{r}(t - t_{w}) \right] dR^{H}, \qquad (22)$$

gdzie

$$= R/d_0$$
(23)

jest bezwymiarową współrzędną liniową.

Przez analogię do szybkości reakcji spalania przyjęto, że szybkość wyzwalania energii chemioznej paliwa, w rozpatrywanym elemencie objętości plomienia, jest proporcjonalna do lokalnej energii chemicznej (Mi)<sub>ch</sub> jeszcze nie wyzwolonej:

R\*

$$= d(Mi) = /dt = a \cdot (Mi)_{oh}$$
(24)

Mnożąc równanie (24) przez d<sub>0</sub> i dzieląc przez lokalną prędkość w gazów płomieniowych otrzymuje się wyrażenie

$$= d(Mi)_{ch}/dR^{\#} = A . (Mi)_{ch}, \qquad (25)$$

w którym

$$dR^{\#} = wdt/d_0 = dR/d_0$$

zaś symbolem A oznaczono bezwymiarowy stosunek

$$A = \frac{a \cdot d_0}{x}$$
(26)

stanowiący charakterystyczny parametr profilu temperatury w płomieniu i określający szybkość spalania paliwa.

Calkując, po rozdzieleniu zmiennych, wyrażenie (25) w granicach od wylotu palnika do punktu w płomieniu o współrzędnej  $R^{\frac{N}{2}}$ 

$$-\int_{(Mi)_{ch}}^{(Mi)_{ch}} d(Mi)_{ch} / (Mi)_{ch} = A \int_{0}^{R^{*}} dR^{*}$$
(25a)

otrzymuje się, po wykonaniu działań i ponownym zróżniczkowaniu entalpii (Mi)<sub>ob</sub>:

$$- d(Mi)_{ch} = A \cdot (Mi)_{ch0} e^{-AR^*} dR^*$$
 (27)

przy czym entalpia chemiczna (Mi)<sub>ch0</sub> substratów spalania jest określona wzorem:

$$(Mi)_{ch0} = \frac{(MW_d)}{1 + \lambda \cdot n_{a \min}}$$
(28)

Wartość opałową (MW<sub>d</sub>) paliwa można wyrazić formalnie za pomocą entalpii fizycznej spalin kalorymetrycznych (tj. spalin uzyskanych po całkowitym i zupełnym spaleniu paliwa w adiabatycznej komorze spalania przy stosunku nadmiaru powietrza  $\lambda = 1$ ):

$$(\mathsf{MW}_{d}) = (\mathbf{n}_{s}'')_{s=1} \cdot (\overline{\mathsf{Mc}_{p}})_{k}(\mathbf{t}_{k} - \mathbf{t}_{0})$$
(29)

Jeżeli substraty spalania są podgrzane, to należy fakt ten uwzględnić przy wyznaczaniu temperatury kalorymetrycznej  $t_k$ . Podstawiając (29), a następnie (28) do (27) otrzymuje się:

$$- d(Mi)_{ch} = \frac{(n_s^*)_{k=1}}{1 + k \cdot n_{a \min}} (\overline{Mo_p})_k (t_k - t_0) A e^{-AR^*} dR^*$$
(30)

Analizując wyniki pomiarów temperatury można wyróżnić w płomieniu kierunek charakteryzujący się największą przewlekłością spalania i zarazem najwyższymi wartościami temperatury. W płomieniach niezawirowanych kierunek ten odpowiada osi palnika ( $\varphi = 0$ ), zaś w płomieniach zawirowanych nie pokrywa się z osią palnika ( $\varphi > 0$ ), przy czym wartość kąta  $\varphi$  dla tego kierunku zależna jest od stopnia zawirowania substratów.

- 25 -

Ograniczając daleze rozważania do tego charakterystycznego kierunku można przyjąć, że gradient temperatury w kierunku prostopadłym wynosi tam

$$\partial t/\partial r = 0$$
 (31)

Entalpię fizyczną (Mi), gazów płomieniowych można zapisać następująco:

$$Mi)_{f} = (\overline{Mc_{p}})(t - t_{0})$$
(32)

Podstawiając wyrażenia (30), (31) i (32) do równania (22) i wykonując konieczne przekształcenia otrzymuje się bezwymiarowe równanie różniczkowe

$$\frac{d\Theta}{dR} + E \cdot \Theta = C \cdot Ae^{-AR^{*}} + E \Theta_{W}, \qquad (33)$$

które po scałkowaniu, przy warunku brzegowym

$$\mathbf{R}^{*} = \mathbf{0} : \mathbf{\Theta} = \mathbf{\Theta}_{-} \tag{34}$$

prowadzi do bezwymiarowego równania profilu temperatury,w określanym wcześniej kierunku w płomieniu:

 $0 = \frac{t - t_0}{t_1 - t_0}$ 

$$\Theta = \left[\frac{CA}{A-E} - (\Theta_{w} - \Theta_{T})\right] e^{-ER^{\theta}} - \frac{CA}{A-E} e^{-AR^{\theta}} + \Theta_{w}$$
(35)

W równaniu tym występują zredukowane temperatury: substratów

$$\boldsymbol{\Theta}_{\mathbf{r}} = \frac{\mathbf{t}_{\mathbf{r}} - \mathbf{t}_{\mathbf{0}}}{\mathbf{t}_{\mathbf{k}} - \mathbf{t}_{\mathbf{0}}},\tag{36}$$

ścian komory spalania

$$u_{w} = \frac{t_{w} - t_{0}}{t_{k} - t_{0}},$$
 (37)

(38)

plomienia

oraz bezwymiarowe wielkości C i E

$$C = \frac{(n_{s}'')_{h=1}}{1 + h \cdot n_{s} \min} \cdot \frac{(\overline{Mc_{p}})_{k}}{(\overline{Mc_{p}})}, \qquad (39)$$

$$E = \frac{4Md_0 \sigma_r}{w \rho r(M \rho_p)}, \qquad (40)$$

które, razem z określoną uprzednio wielkością A, są charakterystycznymi parametrami profilu temperatury w płomieniu.

Z warunku na ekstremum funkcji (35) można określić współrzędną R<sup>#</sup>max punktu o najwyższej temperaturze

$$\stackrel{\text{\tiny (a)}}{\underset{\text{\tiny (b)}}{\underset{\text{\tiny (b)}}}{\underset{\text{\tiny (b)}}{\underset{\text{\tiny (b)}}{\underset{\text{\tiny (b)}}{\underset{\text{\tiny (b)}}}}}}}}}}}}}}}}}}$$

oraz wartość © temperatury maksymalnej, po podstawieniu wyrażenia (35a) do równania (35).

#### 2.2. Charakterystyczne parametry profilu temperatury w plomieniu

Z rozważań przeprowadzonych w punkcie 2.1 wynika, że profil temperatury w płomieniu jest opisany za pomocą wartości trzech charakterystycznych parametrów A, C i E.

Parametr A (równanie (26)) można wykorzystać do określenia granicy obszaru płomienia, jeżeli zdefiniuje się tę granicę za pomocą określonej wartości stosunku g pewnej resztkowej wartości entalpii chemicznej (Mi)<sub>ch,</sub> gazów płomieniowych do entalpii chemicznej (Mi)<sub>ch0</sub> substratów

$$\mathbf{g} = (\mathbf{Hi})_{\mathrm{ob}, \mathbf{g}} / (\mathbf{Hi})_{\mathrm{ob0}}$$
(41)

Podstawiając wyrażenie (41) do całki (25a) otrzymuje się współrzędną R<sub>g</sub> granicy płomienia w kierunku określonym odpowiednią wartością kąta 9:

$$R^*(\varphi) = -\ln g/A(\varphi) \tag{42}$$

W szozególności długość L niezawirowanego płomienia wynika z (42) dla  $\varphi = 0$ :

$$L/d_0 = R^{\#}(\varphi = 0) = -\ln g/A$$
 (43)

Jak widać możliwe jest określenie długości płomienia na podstawie zwierzonege w tym płomieniu profilu temperatury.

Do oceny długości niezawirowanych płomieni turbulentnych służy znama formuża [28, 71]:

$$L = b \cdot \frac{*_0 d_0^2}{p_{ef}}$$
(44)

Porównując wyrażenia (43) i (44) otrzymuje się

$$A = -\frac{\ln g}{b} \cdot \frac{D_{ef}}{w_0 d_0} = \frac{b_1}{(Re)_{ef}(Se)_{ef}}$$
(45)

przy czym efektywne (dla przepływu turbulentnego) liozby Reynoldsa (Re)<sub>ef</sub> i Schmidta (So)<sub>ef</sub> wynoszą

$$(Re)_{ef} = \frac{\sqrt[n]{0} d_0 P_0}{\sqrt[n]{ef}}, \quad (Se)_{ef} = \frac{\sqrt[n]{1} e_0}{\sqrt[n]{0} e_f} \quad (46)$$

Długeść gazewych płomieni kinetycznych jest odwrotnie properojenalna do prędkeści spalania w<sub>r</sub> [28, 71]

$$L/d_0 = b' \cdot w_0/w_T$$
, (47)

która te prędkość z kolei jest preporcjenalna do stalej k szybkości reakcji spalania

$$w_T \sim k \cdot d_0$$
 (48)

Poréwaując wyrażenia (43) i (47) oraz wykorzystując (48) otrzymuje się

$$A = -\frac{\ln g}{b'} \cdot \frac{w_{\rm T}}{w_{\rm 0}} = b_2 \cdot \frac{k \cdot d_{\rm 0}}{w_{\rm 0}}$$
(49)

Bezwymiarewa wielkość k  $d_0/w_0$  ma charakter liozby kryterialnej podobieństwa, która pojawia się przy rozważaniu procesów chemicznych i znane jest w literaturze [21].

Vyraženia (45) i (49) pokazują, że parametr A mežna wyrazić za pomoog wielkeści limitującej spalanie ( $D_{ef}$  lub k) i słusznie econione wcześniej, że obarakteryzuje on szybkeść spalania.

showshinking stage balances a second state plantation to take

Parametr C (równanie (39)) jest stosunkiem pojemności cieplnej spalin kalorymetrycznych i średniej pojemności cieplnej gazów płomieniowych pomnożonym przez tzw. stosunek s kontrakcji chemicznej [27]

 $C = s \cdot \frac{\left(n_{s}^{*}\right)_{k=1} \left(\overline{Me_{p}}\right)_{k}}{n_{s}^{*} \cdot \left(\overline{Me_{p}}\right)}, \qquad (50)$ 

gdzie

$$s = \frac{n_s'}{1 + \lambda + n_a \min}$$
 (50a)

Wartości parametru C, które powinny być bliskie jedności, można wykorzystać do wyznaczenia, na podstawie pomiaru profilu temperatury w płomieniu, średniej pojemności cieplnej gazów płomieniowych.

Parametr E (równanie (40)) charakteryzuje promieniowanie stożka ściętego o małym kącie rozwarcia i o promieniu r wyciętego wzdłuż długości płomienia, ponieważ występuje w nim uśredniona według długości płomienia wartość  $\alpha_r$  promienistego współczynnika wnikania ciepła. Równanie (40) można przekształcić następująco:

$$E = \frac{4Md_0 \sigma_r^{\prime}}{w\rho_r(Mo_p)} = \frac{\sigma_r^{\prime}r}{\lambda_q} \cdot \frac{\lambda_q}{\overline{o_p}\rho^{\prime}} \cdot \frac{\eta}{w_r} \cdot \frac{4d_0}{r} =$$
$$= \frac{(Nu)_r}{Re + Pr} \cdot \frac{4d_0}{r} \qquad (40a)$$

(Nu) oznacza "radiacyjną" liczbę Nusselta:

$$\left(\mathrm{Nu}\right)_{\mathbf{r}} = \frac{\alpha_{\mathbf{r}} + \mathbf{r}}{\beta_{\mathbf{q}}} \tag{51}$$

a liczby Reynoldsa i Prandtla określono tu odpowiednio:

$$Re = \frac{wr}{\sqrt{2}}, \quad Pr = \frac{\overline{o} o \sqrt{2}}{\frac{2}{q}}$$
(52)

Wartość parametru E wyznaczona na podstawie pomiaru profilu temperatury w plomieniu może służyć, np. do obliczania średniej emisyjności opisanej wcześniej bryły gazów plomieniowych.

Rozważania powyższe wykazały, że pomiar profilu temperatury w płomieniu może być wykorzystany m.in. do określenia długości płomienia oraz średniej pojemności cieplnej i emisyjności gazów płomieniowych.

#### 2.3. Uogólniona charakterystyka gazowych płomieni dyfuzyjnych

Równanie (35) może znaleźć różne zastosowania praktyczne. Może ono służyć do przewidywania profilu temperatury płomienia zrealizowanego w ściśle określonych warunkach. Można za pomocą równania (35) oceniać wpływ parametrów substratów (temperatura, prędkość wypływu z palnika, stosunek nadmiaru powietrza, skład i wartość opałowa paliwa) na średnią temperaturę płomienia oraz na poziom zużycia paliwa w procesie. Dla utylizacji równania (35) konieczna jest znajomość zależności parametrów A, C i E od warunków brzegowych, czyli charakterystyki płomieni. W niniejszej pracy określono taką charakterystykę dla gazowych płomieni dyfuzyjnych o średnich prędkościach wypływu substratów z palnika, na podstawie wyników doświadczalnych badań płomieni, opracowanych za pomocą teorii podobieństwa.

#### 2.3.1. Liczby kryterialne podobieństwa płomieni dyfuzyjnych

Analiza układu równań różniczkowych opisujących zjawisko spalania pozwala wyodrębnić szereg liczb kryterialnych podobieństwa [32].Jednak tylko nieliczne z nich mają charakter liczb opisujących warunki brzegowe [35, 61]. Zwykle przy opracowywaniu wyników doświadczalnych płomieni wystarczy użycie tylko dwóch liczb kryterialnych [34, 36], mianowicie liczby

$$\mathbf{K}_{1} = \frac{\mathbf{P}_{0} \mathbf{w}_{0} \mathbf{d}_{0}}{\mathbf{P}_{0} \mathbf{r}_{0}}$$
(53)

orag liczby

(54)

Liczba K<sub>1</sub> (wzór (53)) jest tzw. efektywną (dla przepływu turbulentnego) liczbą Reynoldsa. Zawiera ona informacje o wymiarach komory spalania (średnica D, długość L), o rodzaju gazu (teoretyczne zapotrzebowanie powietrza do spalania  $n_{a \min}$ ) oraz o wielkości pół przekrojów wylotowych dysz gazu (A<sub>g</sub>) i powietrza (A<sub>a</sub>), czyli o najistotniejszych cechach konstrukcyjnych palnika.

Liczba K<sub>2</sub> (wzór (54)) charakteryzuje stosunek energii kinetycznej do pełnej entalpii strugi na wylocie z palnika. Zawiera ona dane o wartości opałowej paliwa, o stopniu podgrzania i prędkościach wypływu substratów z palnika.

Stosowanie większej ilości liczb kryterialnych komplikuje na ogół opracowywane formuły, a przy tym wcale lub tylko nieznacznie poprawia dokładność formuł [36].

#### 2.3.2. Parametry substratów, cechy konstrukcyjne palmika i kemory spalania

Organizacja dyfuzyjnego plomienia gazowego polega na oddzielnym doprowadzeniu substratów do komory spalania. Strugi gazu i powietrza wypływające z palnika, przez dysze organizujące ich prędkości, mogą być do siebie równeległe, zderzać się pod pownym kątem oraz mogą być zawirowane.Zarówno paliwo jak i powietrze mogą być zimne lub podgrzane.Dla uwzględnienia wszystkich tych ozymników dogodnie jest wprowadzić do rozważań strugę zastępozą [37]. Frzyjmując, że z palnika wypływają tylko dwie strugi (paliwo i powietrze), ce najozęściej ma miejsce w praktyce, parametry strugi zastępozej, niezbędne de wyznaczenia liczb kryterialnych  $K_1 i K_2$ , eblicza się wz mastępujących wzorów:

- sestesó Po

$$\rho_0 = \frac{\dot{m}_g + \dot{m}_g}{\dot{v}_g + \dot{v}_g}$$
(55)

(36)

- predkość wypływu wo

121

- średnica do zastępczej dyszy

strictly with success 1 don't

$$d_0 = 2 \sqrt{\frac{1}{3\rho_0 w_0}}$$
 (57)

- pelna (chemiczna i fizyczna) entalpia właściwa

$$_{0} = \frac{m_{g}(\Psi_{d} + i_{g}) + m_{a}i_{a}}{m_{g} + m_{a}}$$
(58)

 efektywny współczynnik lepkości [14] w komorze spalania jak na rysunku 5a

$$\gamma_{ef0} = 0,012 \cdot D^{2/3} L^{-1/3} \rho_0^{2/3} (m_g w_g^2 + m_g w_g^2)^{1/3}$$
 (59)

and open and appropriate experiments in a subscription of the strength of the

W przypadku, gdy np. składowe prędkości strugi powietrza osiowa promieniowa w i styczna w są różne od zera, we wzorze (56) należy podstawić prędkość wypadkową

- 31 -

$$= \sqrt{w_{a1}^2 + w_{a2}^2 + w_{a3}^2}$$

#### 2.3.3. Uogólniona charakterystyka plomieni

Jedną z metod rozwiązywania skomplikowanych zagadnień brzegowych, a do takich zaliczyć trzeba płomień, jest opracowanie wyników badań eksperymentalnych w postaci zależności dowolnej charakterystyki płomienia od liczb kryterialnych podobieństwa. Zależność taka, z matematycznego punktu widzenia, jest oałką szczególną zagadnienia brzegowego episującego płomień. Przedmiotem zainteresowania jest tutaj profil temperatury w płomieniu.Wyprowadzone woześniej bezwymiarowe równanie (35) profilu temperatury w płomieniu wymaga, dla jego uogólnienia, opracowania wyników badań doświadczalnych płomieni w postaci zależności charakterystycznych parametrów A, C i E od liczb kryterialnych podobieństwa K, i K<sub>2</sub>:

$$L = f_1(K_1, K_2)$$
 (60)

 $C = f_2(K_1, K_2)$  (61)

$$E = f_{3}(K_{1}, K_{2})$$
 (62)

Dla uzyskania szczegółowej postaci funkcji  $f_1, f_2$  i  $f_3$  należy wykonać pomiary profili temperatury, w celu wyznaczenia parametrów A, C, E, szeregu płomieni zrealizowanych przy różnych warunkach brzegowych opisanych liczbami K, i K<sub>2</sub>.

W następnym rozdziale przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych gazowych płomieni dyfuzyjnych oraz uzyskaną uogólnioną temperaturewą charakterystykę płomieni.

EV1-2, EV30, 810,0 = 5

3. DOŚWIADCZALNE OKREŚLENIE TEMPERATUROWEJ CHARAKTERYSTYKI DYFUZYJNYCH PŁOMIENI GAZOWYCH

W palnikach gazowych stosowanych powszechnie w przemyśle [11, 12] struga gazu wypływająca z centralnej dyszy otoczona jest strugą powietrza, która zderza się z nią zwykle pod kątem  $\alpha = 20^{\circ}$  względem osi palnika.Struga powietrza jest na ogół w niewielkim stópniu zawirowana (stosunek wypadkowej do osiowej składowej prędkości wynosi ok. 1,077). Tak więo cechy konstrukcyjne palnika określają u jego wylotu składowe prędkości strug gazu i powietrza. Pozostałe parametry substratów (wartość opalowa W<sub>d</sub> i teoretyczne zapotrzebowanie powietrza n<sub>a min</sub> do spalania paliwa, stosunek nadmiaru powietrza 2, stopień podgrzania substratów, obciążenie) są zdeterminowane poza palnikiem. Doskonalenie palnika powinno więo polegać na określeniu wartości prędkości substratów (pół przekrojów dysz gazu i powietrza) najlepszych (według przyjętego kryterium) dla danych warunków brzegowych. Wynika stąd petrzeba zapewnienia w trakcie badań zmian prędkości wypływu substratów w możliwie szerokim zakresie.

Teoria podobieństwa wskazuje, że dla uzyskania zmian wartości liczb kryterialnych można zmieniać wartości dowolnych wielkości, tworzących te liczby i nie powinno to mieć wpływu na końcowy wynik, w tym przypadku na postać funkcji (60), (61) i (62). Można więc tak zorganizować eksperyment, aby uzyskać jak najwięcej różnych danych dokonując jak najmniejszej ilości zmian wielkości opisujących warunkiebrzegowe.

Oceniono, że dla palników gazowych stosowanych w piecach grzewczych liczba kryterialna K<sub>1</sub> przyjmuje wartości w przedziale 25;100, przy czym im większy palnik tym wyższa wartość liczby K.Najliczniejsza grupa palników o mocach od 50 do 500 kW charakteryzuje się wartościami K = 30;45, czyli 10-krotnemu wzrostowi mocy palnika odpowiada okożo 1,5-krotny wzrost wartości liczby K<sub>1</sub>. Podstawiając równania (55), (56), (57) i (59) do równania (53) można po przekształceniach przedstawić liczbę K<sub>1</sub> w postaci

$$K_{1} = \frac{\frac{T_{a}}{\sqrt{\pi}}}{(1 + M_{a})^{1/6}} \frac{(1 + M_{a})^{1/6}}{(1 + M_{a})^{1/6}} \frac{(1 + M_{a})^{1/6}}{(1 + M_{a})^{1/6}} \cdot \frac{1}{K}, (63)$$

gdzie

$$m = m_a/m_g$$
,  $w = w_a/w_g$  (64)

$$k = 0,012 \cdot D^{2/3} \cdot L^{-1/3}$$
, (65)

która pozwala przeanalizować wpływ poszczególnych wielkości na wartość liczby K. Przyjmując dla uproszczenia, że w = 1 oraz  $T_a = T_g$  otrzymuje się ze wzoru (63) wyrażenie

$$K_{1} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left( 1 + \lambda \cdot n_{a \min} \right)^{1/6} \cdot A_{g}^{1/6} \cdot \frac{1}{k}, \qquad (66)$$

z którego wynika, że zmiana rodzaju paliwa w stałej komorze (k=idem) wpływa następująco na stosunek liczby K<sup>''</sup> po zmianie do K'<sub>1</sub> przed zmianą paliwa

$$\frac{\mathbf{K}'_{1}}{\mathbf{K}'_{1}} = \left(\frac{1+\lambda \cdot \mathbf{n}'_{a \min}}{\lambda \cdot \mathbf{n}''_{a \min}}\right)^{1/6} \cdot \left(\frac{\lambda \cdot \mathbf{n}'_{a \min}}{1+\lambda \cdot \mathbf{n}'_{a \min}}\right)^{1/6}$$
(67)

Traktując gaz koksowniozy jako paliwo odniesienia ( $\lambda$ . n'a min =4) dla niskokalorycznej mieszanki gazowej ( $\lambda$ . n'a min = 2) otrzymuje się z (67) wartość stosunku K''/K'<sub>1</sub> = 1,031, dla gazu ziemnego ( $\lambda$ . n'' min = 9) wartość K''/K' = 0,981. Wynika stąd, że wpływ rodzaju paliwa na liczbę K<sub>1</sub> jest znikomy. Również słaby wpływ na K<sub>1</sub> wywierają zmiany wartości stosunków m i w.

Vartości wielkości k dla kilku doświadozalnych komór spalania

- komora w dawnym ZBiD Biprohut

$$k = 0.009$$
 655 (D = 1.25 m, L = 3 m, dopuszczalna moc palnika 400 kW)

- komora IEG w Dąbrowie Górniczej

$$k = 0,008$$
 143 (D = 1,0 m, L = 3,2 m, dopuszozalna moc palnika  
600 kW)

- komora ITC w Gliwioach

k = 0,010 836 (D = 0,9 m, L = 1,1 m, dopuszczalna moc palnika 70 kW)

wskazują, że wymiary komory odpowiednio dobrane do mocy palnika nie wpływają silnie na wartości liczby K.

Najwyraźniejszy wpływ na liczbę K<sub>1</sub> wywiera wielkość palnika (A<sub>2</sub>).Analiza uproszczonego wzoru (66) przy k z idem oraz  $\lambda$ . a min = idem wskazuje, że przy 10-krotnym wzroście mocy palnika K<sub>1</sub> rośnie ok. 1,47 razy oraz wzrasta 2-krotnie przy 67-krotnym wzroście mocy palnika.

Wartości liczby  $K_2$  (równanie (54)) występujące w praktyce zawierają się w przedziałe (20;700). 10<sup>-6</sup>. Najliczniejsza grupa palników charakteryzuje się wartościami liczby  $K_2 = (20;400)$ . 10<sup>-6</sup>. Najistotniejszy wpływ na zmiany liczby  $K_2$  wywierają zmiany wartości prędkości wypływu gazu i powietrza z palnika, przy czym dla tzw. gazów "mocnych" dominuje wpływ prędkości powietrza (równanie (56)) ponieważ wyraźnie wzrasta wówczas wartość stosunku m (równanie (64)).

Dla zimnych substratów z równania (58) wynika, że entalpia

$$\dot{\mathbf{1}}_{0} = \frac{\mathbf{W}_{d}}{\mathbf{1} + \mathbf{m}} \tag{68}$$

nie ulega silnym zmianom ponieważ wzrostowi wartości opażowej W<sub>d</sub> paliwa towarzyszy wzrost wartości stosunku m. Wyraźniejsze zmiany wartości liczby K<sub>2</sub> powoduje podgrzanie substratów, wpływające mocniej na w<sub>0</sub> niż na i<sub>0</sub>.

W warunkach laboratoryjnych, ze względu na koszty i inne erganiczenia, nie ma na ogół dużego wyberu spośród wielkości brzegowych, tworzących liczby kryterialne, których wartości ohciałoby się zmieniać w szerokim zakresie. Zwykle do dyspozycji jest jedna doświadczalna komora spalania przez co również zdeterminowana jest wielkość (moc) palnika, która może ulegać niewielkim zmianom. Jeżeli również laboratorium zasilane jest określonym paliwem gazowym, np. gazem keksowniczym, dla którego w praktyce na ogół nie stosuje się w wysokim stopniu podgrzewania substratów, to okazuje się. że jedynymi wielkościami, które można zmieniać w szerszym zakresie, są prędkości wypływu substratów z palnika. Wymaga to zbudowania szeregu lub jednego palnika uniwersalnego wyposażonego w dysze gazu i powietrza z meżliwością regulacji pola przekroju wolnego dla wypływu. Takie rozwiązanie zastosowane w przedstawionej pracy pozwoliło na uzyskanie wartości liczby K w przedziale 28:40, co daje wartość stosunku K min = 1,49 odpowiadającą w przybliżeniu wartości tego stosunku, jaką można uzyskać przy 10-krotnym wzroście mocy palnika. Liczba K, przyjmoważa podczas badań wartości w przedziale (20;350) . 10<sup>-6</sup>, co w znacznym stopniu pokrywa przedział, w którym występują jej praktycznie spotykane wartości. Należy tu jeszcze dodać, że stosowanie podgrzanego powietrza do spalania gazu kekse wniczego mogłoby doprowadzić do wystąpienia w płomieniu temperatur, które nie byłyby dostępne dla pomiarów za pomocą termopary PtRh-Pt.

#### 3.1. Stanowisko doświadozalne i zakres badań

Dla przeprowadzenia badań eksperymentalnych płomieni saprojektowano, wy konano i wyposażono w odpowiednią aparaturę pomiarową [65] stanowiske laboratoryjne (rys. 6), którego schemat przedstawiono na rysunku 7. Doświać czalną komorę spalania KS, o wewnętrznej ekwiwalentnej średnicy D = 0,9 m i długości L = 1,1 m, wyposażono w poziomo usytuowany palnik gazowy P zaprojektowany i wykonany według wskazówek autora przez mgr inż. J. Żelińskiego. Konstrukcja palnika umożliwia ciągłą zmianę pola przekroju wylotowego dyszy gazowej oraz dyskretną zmianę pola przekroju wylotowego dy-



Rys. 6. Widok stanowiska badawczego

szy powietrza. Tworzące dysz gazu i powietrza zawierają z osią kąt 20°, typowy dla większości palników przemysłowych.

Palnik zasilano z sieci gazem koksowniczym, którego strumień v mierzono za pomocą rotametru R i regulowano kurkiem K. Skład gazu i spalin badano za pomocą analizatora Orsata, zaś wartość opałową v gazu kontrolowano za pomocą kalorymetru Junkersa.

Strumień powietrza z wentylatora W mierzono za pomocą zwężki Z i regulowano zaworem Z1. Temperaturę t gazu i t powietrza przed palnikiem mierzono za pomocą termometrów oporowych, spadek ciśnienia  $\Delta h_a$ na zwężce oraz manometryczne ciśnienie  $p_m$  gazu i  $p_m$  powietrza przed palnikiem za pomocą manometrów cieczowych, zaś wilgotność powietrza przed palnikiem za pomocą manometrów cieczowych, zaś wilgotność powietrza za pomocą psychrometru Augusta. Prowadzono również pomiary cieśnienia  $p_{ot}$  i temperatury t powietrza w hali laboratoryjnej. Temperaturę t wewnętrznej powierzchni ścian komory spalania mierzono w dwóch punktach sklepienia za pomocą termopar T1 i T2 (PtRh-Pt) i zapisywano na rejestratorze R1, gdzie zapisywano również temperaturę t powietrzających komorę spalania mierzoną za pomocą termopary T3 (PtRh-Pt). Próbkę spalin pobierano za pomocą sondy SP chłodzonej wodą do analizy w aparacie Orsata. Do pomiaru temperatury w osi płomienia stosowano termoparę T (PtRh-Pt) z odsłoniętą spoiną pomiarową. Dle zapewnienia powtarzalnego geometrycznie umieszczenia spoiny termopary T w punktach pomiarowych skonstruowa-



no [66] widoczny na pierwszym planie (rys. 6) układ US do samoczynnego prowadzenia czujnika w obszarze pomiarowym, w którego suporcie S zamocowana była termopara T. Wyniki pomiaru temperatury t<sub>g</sub> w osi płomienia rejestrowano za pomocą motokompensatora R2 klasy 0,25 oraz kontrolowano za pomocą miliwoltomierza cyfrowego.

- 37 -

Pomiary profilu temperatury plomienia prowadzono w quasi-ustalonym stanie komory spalania, kontrolowanym za pomocą wartości temperatur  $t_{w1}$  i  $t_{w2}$  ścian. Osiągnięcie tego stanu wymagało nagrzewania komory w czasie ok. 4 godzin. Wykonanie pomiarów jednego plomienia zajmowało ok. 2 godzin.

W ramach ninisjszej pracy badaniom poddano płomienie niezawirowane uzyskiwane przy prawie stałej mocy palnika wynoszącej ok. 60 kW, przy stałej wartości  $\lambda = 1,07$  stosunku nadmiaru powietrza doprowadzanego przez palnik, bez podgrzewania substratów. Każdy badany płomień cechował się parą wartości osiowych składowych prędkości w gazu i w powietrza u wylotu palnika, które ustalano za pomocą regulowanych przekrojów wylotowych A i A dysz gazu i powietrza. Zakres wartości prędkości dobrano tak, by zawarte w nim były wartości prędkości stosowane w istniejących palnikach przemysłowych, a więc dla gazu w = 3,4÷50 m/s (10 wartości) i dla powietrza w<sub>a1</sub> = 8÷30 m/s (9 wartości). Zbadano 90 płomieni. Przy stałej wartości kąta & tworzących dysz gazu i powietrza, promieniowe składowe prędkości substratów przy wylocie z palnika były proporcjonalne do składowych osłowych. Nie było więc potrzeby oddzielnego uwzględnienia ich wpływu na płomień.

Pomiary składu spalin opuszczających komorę spalania prowadzono w celu kontroli ilości powietrza zassanej do komory spalania przez nieszczelności.

#### 3.2. Wyniki pomiarów

Jak juž wspomniano, badaniom poddano 90 płomieni [68] zrealizowanych przy 10 wartościach osiowej składowej w prędkości wypływu gazu z palnika -  $w_{g1} = 3,4, 4,1, 4,8, 5,6, 6,9, 8,7, 11,7, 18,3, 33,0, 48,0 m/s i przy$ 9 wartościach osiowej składowej w prędkości wypływu powietrza z palni $ka - <math>w_{a1} = 8,1, 9,8, 12,4, 14,0, 17,4, 18,8, 20,6, 25,4, 30,0 m/s.$  Dla każdego płomienia zmierzono 24 wielkości charakteryzujące palnik, komorę spalania, paliwo gazowe, powietrze, spaliny i otoczenie. Ze względu na dużą objętość wyników pomiarowych w tablicy 1 podano jedynie ich przykład dla wybranej grupy płomieni, zrealizowanych przy stałej wartości pola  $A_g$ przekroju wylotowego dyszy gazowej i uporządkowanych według wzrastającej wartości pola  $A_g$  dyszy powietrza.

Określono również charakterystyczny profil temperatury każdego płomienia przez pomiar temperatury t spoiny termopary w 10 punktach położonych wzdłuż osi palnika, opisanych współrzędną R.

PONGATION         PONGATION           A.         FOULATION         PONGATION           Colspan="6"         Voltation           a         A         PONGATION           a         A         PONGATION           a         A         PONGATION           a         A         PONGATION           a         PONGATION         PONGATION           PONGATION         PONGATION           a         PONGATION           B         PONGATION         PONGATION           PONGATION         PONGATION           PONGATION <th< th=""><th>Ofocwanie Komora Spaliny</th><th>Pot tot tut tu2 tap CO2 02</th><th>MPa 9.0 00 00 00 4</th><th>1,1 10,7 7001 047 CTT 0C 070</th><th>000 32 320 790 1050 7.9 1.1</th><th>010 27 360 787 1090 7.4 1,1</th><th>970 32 780 750 990 9.0 2.</th><th>1 0.7 010 730 910 7.0</th><th>2*1 2.4 280 280 880 8°2 4°2 8°2</th><th>997 27 820 800 1040 7.9 1.</th><th></th><th></th></th<>	Ofocwanie Komora Spaliny	Pot tot tut tu2 tap CO2 02	MPa 9.0 00 00 00 4	1,1 10,7 7001 047 CTT 0C 070	000 32 320 790 1050 7.9 1.1	010 27 360 787 1090 7.4 1,1	970 32 780 750 990 9.0 2.	1 0.7 010 730 910 7.0	2*1 2.4 280 280 880 8°2 4°2 8°2	997 27 820 800 1040 7.9 1.		
Aniality         Paritity	etree .	5 Va	* 20	42 15 1	41 18 11	1 51 66	44 16	43 18	44 15 11	39 20	41 16 1	
ALIAN         PALLAN         CHIAN         CON         CON <thc< td=""><td>Pove</td><td>and a Con</td><td>add a/cm</td><td>16.4 25</td><td>16,5 28</td><td>16.3</td><td>16.4 29</td><td>16.4 28</td><td>16,4 27</td><td>16,2 26</td><td>16.4 57</td><td></td></thc<>	Pove	and a Con	add a/cm	16.4 25	16,5 28	16.3	16.4 29	16.4 28	16,4 27	16,2 26	16.4 57	
Aniark         Parit Hole         Parit		00 002 02		0.0 0.9 1.11	0.9 3.7 1.0	9.0 4.0 0.8	10,8 3,1 1,0	10,8 3.5 1.2	11.5 4.2 0.8	0,1 9,5 1,01	10.9 3.7 1.0	
Aliabity         Part 1 + 0         Part 2 +		th Call	*	1,9 2,2	2,1 2,1	1,4 2,1	9,1 0,1	2,9 2,1	2,3 2,2	2,2 2,1	2,1 2,1	
A.I.I.I.         P.I.I.I.           a         (o <sup>3</sup> V <sub>0</sub> P <sub>me</sub> t <sub>e</sub> Vd           a         a         3/a         hPa         0/c         Ms/m <sup>3</sup> a         a         a         bas         0/c         Ms/m <sup>3</sup> Ms           a         a         a         bas         t <sub>e</sub> t <sub>e</sub> Ms/m <sup>3</sup> a         a         a         bas         t <sub>e</sub> t <sub>e</sub> t <sub>e</sub> t <sub>e</sub> a         a         bas         t <sub>e</sub> t <sub>e</sub> t <sub>e</sub> t <sub>e</sub> t <sub>e</sub> 1991         a         a         a         a         a         a         a           1991         a         a         a         a         a         a         a           1991         a         a         a         a         a         a         a         a           1031         a         a         a         a         a         a         a         a           1103         a         a         a         a         a         a         a         a         a           2031         a         a <td></td> <td>H2 CI</td> <td></td> <td>5 50,9 2</td> <td>52,2 23</td> <td>51.6 2</td> <td>51.6 2</td> <td>52.0 2</td> <td>51,2 2</td> <td>31,6 2</td> <td>52,2 2</td> <td></td>		H2 CI		5 50,9 2	52,2 23	51.6 2	51.6 2	52.0 2	51,2 2	31,6 2	52,2 2	
Alinik a di 10 <sup>3</sup> Va par 2 and 10 <sup>3</sup> Va par 1901 3.9 11 1901 3.9 11 1911 4.0 28 192 1.9 10 193 4.0 10 888 4.0 11 815 3.9 10 742 3.9 10 592 4.0 38	P = 1 1 1	s va	0 143/m3	44 18 51	44 19 27:	11 61 24	44 19 49.	45 19 40	46 19 34	39 19 06	42 19 20	
Alata A A A A A A A A A A A A A A A A A A A		and page	"3/= hPa	11 6.0	4,0 28	3,9 32	4,0 10	4,0 11	3,9 10	3,9 10	4,0 38	
A BEAUTING	Paintk	A. 4.	~ 1	1001	1381	6421	202 1103	888	815	742	592	

10 101

Tabilos :

W tablicy 2 zestawiono uzyskane wyniki pomiarów temperatury t<sub>s</sub> dla grupy płomieni przedstawionych już w tablicy 1. Rzeczywistą temperaturę t gazów płomieniowych w punktach pomiarowych obliczono z bilansu energii spoiny termoelementu. Uwzględniono przy tym, że gazy płomieniowe przekazują ciepło do spoiny termoelementu przez konwekcję, spoina zaś przekazuje ciepło do ścian komory spalania przez promieniowanie:

- 39 -

$$= t_{s} + \frac{\varepsilon_{s} - C_{o}}{\omega_{k}} \left[ \left( \frac{T_{s}}{100} \right)^{4} - \left( \frac{T_{w}}{100} \right)^{4} \right],$$
(69)

przy czym współczynnik wnikania ciepła  $\alpha_k$  wyznaczono za W.E. Kaskanem [10] ze wzoru

÷ŧ

$$Nu = 0.8 \text{ Re}^{1/4}$$
 (70)

Wcześniejsze badania [30] podobnych płomieni wykazały, że wzdłuż osi płomienia, dla spoiny termopary o średnicy  $d_g = 0,001 m$ , wartość współczynnika wnikania ciepła  $\alpha_k$  jest prawie stała i wynosi

$$\alpha_{1} = 500 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$$
 (71)

Emisyjność & spoiny termopary PtRh-Pt obliczano ze wzoru opracowarego na podstawie danych tablicowych [26]

$$\mathcal{E}_{s} = 0,000 \ 106 \ . \ t_{s} = 0,038 \ 288$$
 (72)

Błąd  $\Delta t$  temperatury gazów płomieniowych, obliczonej ze wzoru (69),oszacowano wg prawa przenoszenia błędów, przy czym błędy pomiaru temperatury spoiny  $\Delta t$  i temperatury ścian komory spalania  $\Delta t_w$  oceniono uwzględniając dokładność odczytu i klasę przyrządu pomiarowego

$$\Delta t_{g} = 12,8 \text{ K} \qquad \Delta t_{w} = 25,6 \text{ K}$$

Dla pozostałych wielkości występujących we wzorze (69) błędy oszacowano następująco:

. średnica spoiny termopary	Δd <sub>s</sub> /d <sub>s</sub>	= 10%	
- kinematyczny współczynnik lepkości		2	
gazów plomieniowych	20/2	= 20%	
<ul> <li>współczynnik przewodzenia ciepła gazów płomieniowych</li> </ul>	Dra/ra	= 20%	
prodkość razów w otoczeniu spoiny	Aw/w	= 20%	

prędkość gazów w otoczeniu spoiny Δw/w = 20%
 W tablicy 2 zamieszczono również obliczone wartości temperatury t i
 błędu Δt w poszczególnych punktach pomiarowych płomieni.

		Wyis	iki pos	iarów p	rofili to	empera tur	y w plos	ieniach				TROITER
Plomiet 33:	R		0	0,23	8 0,338	0,438	0,518	0.618	0.738	T 0 818	0.029	
	t,	°c	1	1015	1115	1185	1230	1250	1244	1220	1135	1,038
	t	°c	42	1041	1160	1248	1 306	1312	1125	1201	11/3	1130
	At	°c	1	15	18	21	23	24	24	23	20	1179
	-		-			<u></u>	1	1		1 23	1 20	19
Plomień 231	R		0	0,23	0,333	0,433	0.511	0.611	0.731	1 0 811	0.032	1 0 0 0
	1	°c	-	1205	1240	1280	1300	1295	1260	1228	1100	1,033
	2	°c	42	1269	1314	1368	1195	1 188	1741	1205	1190	1175
	41	°c	1	21	23	25	27	27	24	22	1230	1231
					-			1		1	20	20
Planied 13:	R	-	0	0,228	0,328	0,428	0.528	0.628	0.728	0.828	0.028	1.000
4.0.0	1.	°c	-	1100	1210	1315	1325	1380	130	1240	0,920	1,028
	t	°c	40	1136	1274	1413	1498	1505	1302	1240	1130	1080
	42	°c	1	17	21	28	33	31	1393	1312	1173	1112
	-									23	18	10
Plomind 831	R	-	0	0,226	0,326	0,426	0.526	0 626	0.726	0.846	0.016	
	1	°c	-	1445	1445	1304	1320	1020	0,720	0,826	0,926	1,026
		°c	44	1008	1009	18.20	1920		1150	1085	1040	1030
	A.	°c		41	1008	1533	1420	1311	1203	1123	1070	1058
	Lat.				<u>y</u> 41	1 10	29	23	19	17	16	16
Plomień 31	R	-	0	0,223	0,323	0,423	0,523	0,623	0,723	0,823	0,923	1,0.9
(****	٩.	°C	-	1460	1595	1315	1220	1135	1065	1025	985	970
	1	°c	43	1634	1856	1421	1294	1186	1101	1054	1008	991
	40	°c	1	43	62	29	23	19	17	16	15	15
Plomień 731	R		0	0,222	0,322	0,422	0,522	0,622	0,722	0,822	0,922	1,022
	2.	°c	-	1515	1465	1390	1315	1250	1200	1150	1110	1090
	t	°C	44	1716 -	1637	1523	1417	1329	1264	1201	1151	1127
	At	°c	1	49	43	35	28	24	21	19	18	17
Plomień 63:	R	-	0	0,221	0.121	0.421	0.521	0.621	0.221	0.80.	T	
	1	°c	-	1520	1460	1380	1725	1248	4.84	0,821	0,921	1,021
	t	°c	39	1722	1627	1507	1420	1220	1105	1150	1115	1100
	At	°c		49	42	1107	20	22	1243	1199	1150	1138
	-	-							. 20	19	18	17
Plonted 51	1	- 1										
	-	-	-	0,219	0,319	0,419	0.519	0,619	0,719	0,819	0,919	1,019
	-	0	-	1545	1490	1330	1180	1090	1025	990	950	940
	-	C	41	1777	1687	1448	1248	1136	1059	1018	971	961
	<u>At</u>	-c	1	56	48	31	22	18	16	15	15	15
	-					-					1	
Phomiań 431	R	-	0	0,218	0,318	0,418	0,518	0,618	0,718	0,818	0,918	1,018
	· .	°c	- 1	1515	1425	1340	1280	1220	1180	1155	1135	1135
	E	°c	46	1700	1561	1437	1355	1270	1223	1194	1170	1170
	Δt	°c	1	40	35	28	24	20	19	18	17	17
		-										

#### 3.3. Wyznaczenie wartości liczb kryterialnych i parametrów profilu temperatury płomieni

Dla scharakteryzowania parametrów substratów oraz cech konstrukcyjnych palnika i komory spalania obliczono, na podstawie wyników pomiarów, wartości parametrów ρ<sub>0</sub>, w<sub>0</sub>, d<sub>0</sub>, i<sub>0</sub>, ?<sub>ef0</sub> strugi zastępczej wg wzorów (55); (59). W obliczeniach uwzględniono osiowe składowe prędkości wypływu w gazu i w powietrza z palnika ponieważ w warunkach prowadzonych badań promieniowe składowe prędkości wypływu w z i w a2 były proporcjonalne do składowych osiowych prędkości

$$w_{g2} = w_{g1} \cdot tg 20^{\circ}, \quad w_{a2} = w_{a1} \cdot tg 20^{\circ}$$

Następnie obliczono wg wzorów (53) i (54) wartości liczb kryterialnych podobieństwa K, i K<sub>2</sub> i ich błędy. W tablicy 3 przedstawiono wyniki obliczeń w , wai' Po' Wo' do' io' ?efo' K i K2 oraz oceny błędów AK i AK, dla wybranej grupy plomieni.

Po wyznaczeniu temperatury kalorymetrycznej t obliczono dla każdego plomienia wartości zredukowanych nadwyżek temperatury 🖲 substratów, 🔍 ácian komory spalania ze wzorów (36) i (37) oraz wartości e zredukowanej nadwyżki temperatury (wzór (38)) i współrzędnej R<sup>#</sup> (wzór (23)) dla 10 punktów pomiarowych położonych wzdłuż osi palnika.W obliczeniach przyjęto wartość temperatury odniesienia  $t_0 = 25^{\circ}C$ . Następnie określono wartości parametrów A, C, E poprzez dopasowanie równania (35) do zmierzonego profilu temperatury w każdym plomieniu. Z równania (35) dla i-tego punktu pomiarowego wynika

$$\Theta_{1} = \left[\frac{CA}{A-E} - (\Theta_{W} - \Theta_{\Gamma})\right] e^{-ER_{1}^{H}} - \frac{CA}{A-E} e^{-AR_{1}^{H}} + \Theta_{W}$$
(35a)

zaś z pomiaru wartość 010.

Oznaczając parametry charakterystyczne A, C. E przez X, gdzie j = = 1, 2, 3 odpowiednio, można ich wartości wyznaczyć z warunku minimum sumy kwadratów odchyleń  $F(X_i)$  pomiędzy wartościami  $\otimes_{10}$  z pomiaru i  $\otimes_{1}$ z równania (35a)

$$F(X_{j}) = \sum_{i=1}^{m} (\Theta_{i0} - \Theta_{i})^{2} \cdot p_{i} = \min, \quad m = 10$$
(73)

- 41 -

Tablica 3

trów substratów i liczb kryterialnych podobieńst Wyniki obliczeń

						_	-			
\$(10 <sup>6</sup> .K2)		1,3	1.7	2,7	3.3	5.0	5.7	6,8	10,5	14,2
10 <sup>6</sup> .K2	•	31.0	41.6	62,9	75.4	114.8	130.5	154.1	235,0	313.5
ΔK,		1,2	1.2	1,2	1,2	1.1	1,2	1,2	1,1	1.1
K,		37.4	37,0	36.2	35,7	34.7	34,2	33.7	32,5	31.7
?ef 0	kg/(m . s)	0,014	0,014	0,016	0,017	0,019	0,020	0,022	0,026	0,028
<sup>1</sup> 0	kJ/kg	2660,6	2725,0	2652.4	2739.0	2667.0	2713,0	2692.5	2735,2	2662,8
0p	E	4650,0	0,0495	0,0446	0,0424	0,0385	0,0370	0,0355	0,0320	0,0299
0,	s/u	9.1	10,6	12,9	14.4	17.5	18,8	20,4	25,4	28,9
Po	kg/m <sup>3</sup>	1,081	1,016	1,034	0,977	0,988	1,007	1,017	1,041	1,021
"a1	m/a	8,1	9,8	12,3	13,9	17.4	18,9	20,6	26,0	30,0
"e1	m/s	18,3	18,5	18,4	18,4	18,8	18,3	18,2	18,6	18,4
Nr	plom.	33	23	13	83	3	73	63	53	43

- 42 -

Wagi p<sub>i</sub> w równaniu (67) oszacowano według błędu  $\Delta t_i$  pomiaru temperatury t, w i-tym punkcie

$$p_{1} = (\overline{\Delta t}/\Delta t_{1})^{2}$$

$$\overline{\Delta t} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^{m} (\Delta t_{i})^{2}}, \quad m = 10$$
(74)

Ze względu na dość skomplikowaną postać funkcji (35a) do minimalizacji sumy  $F(X_j)$ , po licznych próbach wybrano metodę gradientów [49]. Doskonalenie formy równania profilu temperatury płomienia oraz metody numerycznego wyznaczenia parametrów  $X_j$  sprawiło, że ostateczna wersja programu obliczeń była trzydziestą z kolei. Wartość parametru  $X_j$  w kolejnej (1+1)szej iteracji określano następująco:

$$X_{j}^{l+1} = X_{j}^{l} + u^{l} \cdot g_{j}^{l}, \quad j = 1, 2, 3$$
 (75)

zaś wartość gradientu 😋 z równania

$$B_{j} = \frac{\partial F(X_{j})}{\partial X_{j}}, \qquad j = 1, 2, 3$$
 (76)

Optymalną [38] wartość kroku iteracyjnego wyznaczono po rozłożeniu w szereg Taylora funkcji  $F(u^1)$ 

$$u^{1} = \frac{\sum_{j=1}^{3} (\frac{\partial F}{\partial X_{j}})^{2}}{\sum_{j=1}^{3} \sum_{k=1}^{3} \frac{\partial^{2} F}{\partial X_{j} + \partial X_{k}} \cdot \frac{\partial F}{\partial X_{j}} \cdot \frac{\partial F}{\partial X_{k}}}$$
(77)

Zakończenie iteracji następowało wówczas, gdy wartości sumy kwadratów odchyleń w dwóch kolejnych iteracjach różniły się o

$$\left|F(X_{j}^{1}) - F(X_{j}^{1+1})\right| \leq 0,000\ 000\ 1 \tag{78}$$

Ilość iteracji dla peszesególnych plomieni była różna, wynosiła od kilkudziesięciu do tysiąca i pochłonęła sporo czasu maszyny cyfrowej. W tablicy 4 zestawiono obliczone wartości parametrów A, C, E oraz oceny błędów względnych  $\delta A$ ,  $\delta C$ ,  $\delta E$  dla wybranej grupy plomieni. Dokładność wartości parametrów A, C, E wynika z warumku (78). Podano tam również wartość

- 43 -

-7 Tablica

28,6 56,6 74.1 72,5 30,5 1ª 19,5 21,9 2 м 41,8 27 20 80. 1,8 3,1 4,5 1,4 19.7 1,0 1.4 2.7 2.5 plomianiach 0,114 0,115 0,102 0,078 0,076 0,051 0,049 240\*0 50 0,059 . > parametrów profilu temperatury 30 0.7 1,9 R 1,4 0.6 1,5 4.0 0.5 1,5 6'0 1,021 1,058 0,959 0,988 0,961 0,910 0,908 1,000 0,854 0 1 Wyniki obliczeń dA 1.7 3,5 4.9 x 3.7 14,2 4,9 8,5 20,2 14.1 0,123 0,148 0,143 0,400 0,550 0,600 0,700 \* 0,750 0,650 1 Nr plom 33 23 5 83 3 23 63 53 43 biorrane dalasty at the second of (00) advantation of all of the electron back

- 44 -





średniego odchylenia <u>At</u> temperatury zmierzonej i obliczonej z dowasowanego równania (35a).Na rysunku 8 przedstawiono profile zredukowanej temperatury w osi płomienia w funkcji bezwymiarowej współrzędnej R<sup>#</sup> dla wybranych płomieni. Kółeczkami zaznaczono wartości O wynikające z pomiarów, zaś linią ciągłą funkcję (35) uzyskaną poprzez dopasowanie, przy czym widoczna jest dobra na ogół jakość dopasowania. Dość znaczna odległość pierwszego punktu pomiarowego od wylotu palnika wynikała z faktu, że przy przejściu przez ścianę komory płomień rozwijał się w obrębie kształtki palnikowej, przez co obszar ten był niedostępny dla pomiarów.

- 46 -

Spośród przebadanych 90 płomieni odrzucono wyniki badań 12 płomieni, ze względu na przyssanie nadmiernej ilości fałszywego powietrza do komory spalania, co wywołało znaczne odchylenie płomienia od osi palnika na skutek działania sił wyporu, a spowodowane zostało przez niedopilnowanie odpowiedniej wartości ciągu kominowego. Dla zobrazowania zakresu wartości określanych wielkości dla całej próby 78 płomieni, wyniki obliczeń liczb kryterialnych K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, parametrów profilu temperatury A, C, E oraz średniego odchylenia dopasowania  $\overline{At_1}$  przedstawiono w postaci rozkładów wymienionych wielkości (rys. 9). Jeżeli w badanej próbie płomieni dana wielkość przyjmuje wartość w określonym przedziale n<sub>1</sub> razy, to częstość P<sub>1</sub> występowania tej wartości wynosi

$$P_{i} = n_{i}/n, \qquad (79)$$

gdzie n = 78 jest równe ilości rozpatrywanych płomieni.

Liozba kryterialna K<sub>1</sub> przyjmowała, dla badanych płomieni, wartości w zakresie K<sub>1</sub> = 28440, przy czym ponad 50% płomieni cechowało się wartościami K<sub>1</sub> = 32436. Liczba kryterialna K<sub>2</sub> zmienia się w zakresie K<sub>2</sub> m = (204350) . 10<sup>-6</sup>, najwięcej, bo ponad 60% płomieni opisanych byłe wartościami K<sub>2</sub> = (504150) . 10<sup>-6</sup>. Średnie odchylenie  $\Delta t_1$  charakteryzujące jakość dopasowania równania (35) do wyników pomiarów, przyjmowało wartości w zakresie  $\Delta t_1$  = 104100 K, przy czym  $\Delta t_1$  = 10440 K wystąpiło dla 67,9% płomieni, zaś  $\Delta t_1$  = 10480 K wystąpiło dla 97,4% płomieni. Parametr A profilu temperatury w płomieniu przyjmował, dla całej próby płomieni, wartości w zakresie A = 0,0540,97, najczęściej (40% przypadków) wartość A = 0,240,4. Wartości parametru C występowały w zakresie C = 0,652,0, przy czym 42% płomieni posiadało wartości C = 0,941,1. Parametr E zmieniał się w zakresie E = 0,03540,300, najwięcej płomieni (66%) charakteryzowało się wartościami E = 0,03540,100.

Dla badanej próby plomieni (n = 78) sprawdzono czy istnieje zależność pemiędzy poszczególnymi parametrami profilu temperatury (rys. 10). Przyjmując, że zależność ta ma charakter wykładniczy stwierdzono, posługując się metodą najmniejszych kwadratów, że



manage channels [ inc ]. In manage channels [ inc ]. In Proving a set plantamic francy in plantamic Distances plant and Units stagets real



2

03

**Profilu** 

le trów

10.

£

33

- 48 \_

		-				
=	0,268 4	22 .	c <sup>-1,837</sup>	r =	0,738	(80)
×	0,025 7	79 .	E <sup>-0,942</sup>	r =	0,855	(81)
_	0.083 2	216	c1,958	r =	0.867	(82)

Można stąd wnioskować, że istnieje dość silna korelacja pomiędzy poszczególnymi parami parametrów (wartości współczynnika korelacji r są znacznie większe od wartości granicznych dla tych przypadków [49]), co powinno mieć miejsce, jeżeli oczekuje się, że parametry te są funkcją liczb kryterialnych podobieństwa K i K<sub>2</sub> (równanie (60), (61) i (62)). Podane tutaj zależności mogą być wykorzystane przy doborze wstępnych wartości A, C i E w procedurze dopasowywania równania (35) profilu temperatury w płomieniu do wyników pomiarów, przez co czas obliczeń numerycznych zostanie skróceny.

- 49 -

Wykorzystując fakt, że wielkość a występująca w równaniu (24) i we wzorze (26)

 $a = \frac{Au}{d_0}$ (a)

wykazuje podobieństwo do stałej szybkości reakcji, można spróbować ocenić wartość energii aktywacji E<sub>akt</sub> reakcji występujących podozas spalania gazu koksowniczego. W tym celu wykorzystano formułę Arrhaniusa w postaci

$$a = a_0 \exp\left[-E_{akt}/(MR)T\right], \qquad (b)$$

w której w miejsce T podstawiono  $T_{max}$ , zaś w miejsce a wyrażenie (a), w którym zamiast w podstawiono w<sub>0</sub> dla poszczególnych płomieni. Wartości a<sub>0</sub> i E<sub>akt</sub> określono metodą najmniejszych kwadratów i uzyskano wynik

> $a_0 = 60~772~s^{-1}$ E<sub>kt</sub> = 92,4 kJ/mol,

który okazal się realny na tle wartości energii aktywacji  $E_{akt} = 83,7$ ; 167,5 kJ/mol podanych w pracy [6] dla sumaryoznych reakcji węglowodorów spalanych w powietrzu. Należy pamiętać, że w badanych płomieniach o szybkości spalania decydowała, oprócz szybkości reakcji również dyfuzja. Uwzględniając ten fakt można spodziewać się, że rzeczywista wartość  $E_{akt}$ jest w tym przypadku mniejsza niż wartość obliczona.

			-	-	F	2.640	
t	B-01 Sile 0	P,	• <sup>1</sup> 0	41	13	1.3	
	14	-		1 1000	11 1	67613	3.175
-	1 22 10-48	41,914	- 1,349	0,493	- 1646	0,017	atten -
1	orc's	0.815		0.331	0	0,825	2,976
	6,909 . 10-58	53,914				-110-0	1111
T	Print 10 Bi	00.00	- 2,257	0	0	692.0	3, 440
	7,489 . 10	wC1162				105,0	4.304
	010	- 7,205	0	0	0	0,575	-
	3, 051 . 120		- WILL	0,110		0 460	3,609
	201 102	- 0,612	0	1,142	- 7067	20110	
~	10011				-00*	0.771	3,603
	- 466 . 10 <sup>th</sup>	•	0	1,196	cont -		
0		-				0.80%	2,463
	° 122 . 10 <sup>8</sup>	0	0	0*735	•		
-		-		A Com	•	662.0	2,473
50	1,437 . 103	- 0,665	0	1/0*0		a hos	

- 51 -

Tablica 5

#### 3.4. Uogólnienie wyników eksperymentalnych

Jak juž zasygnalizowano w punkcie 2.3.3 uogólniony opis profilu temperatury w płomieniu uzyskać można poprzez określenie zależności charakterystycznych parametrów X (A, C, E) od liczb kryterialnych K i  $K_2$ (równania (60), (61) i (62)) opisujących warunki brzegowe. Do uogólnienia wykorzystano wyniki pomiarów i obliczeń przedstawionej uprzednio próby n = 78 płomieni. Po wstępnych badaniach przeanalizowano szczegółowo zależności (60), (61) i (62) w postaci formuły

- 50 -

$$K_{j} = a_{j} \cdot K_{1}^{b_{j}} \cdot \exp(c_{j} \cdot K_{1}) \cdot K_{2}^{d_{j}} \cdot \exp(f_{j} \cdot K_{2})$$
 (83)

oraz wszystkich wersji jakie można uzyskać przez jej upraszczanie. Poszukiwane wartości stałych  $a_j$ ,  $b_j$ ,  $c_j$ ,  $d_j$ ,  $f_j$  wyznaczono metodą najmniejszych kwadratów, przy czym składniki poszczególnych sum mnożono przez wagi  $p_{ij}$  odwrotnie proporcjonalne do kwadratu błędu względnego  $X_i$ :

$$P_{ji} = \left(\frac{X_{ji}}{\lambda X_{ji}}\right)^2$$
  $j = 1, 2, 3$  (84)

Dla oceny jakości każdej wersji uogólnienia obliczono sumo kwadratów odchyleń  $s_j^2$  powiędzy wartościami  $X_{ji}^0$  wynikającymi z pomjarów oraz wartościami X obliczonymi z formuły (83). Wymnacsono również wartość współczynnika korelacji r<sub>j</sub> pomiędzy logarytmami wartości  $X_{ji}^0$  i X<sub>ji</sub>. Do wykonania obliczeń wartości stałych  $a_j$ ,  $b_j$ ,  $o_j$ ,  $d_j$ ,  $f_j$  w kolejnych wersjach formuły (83) opracowano, z wykorzystaniem rachunku macierzowego, odpowiedni program na maszynę cyfrową.

Obliosone wartości stałych a , b , c , d , f , współczynnika korelacji r , oraz sumy kwadratów odchyleń s dla uogólnienia parametru A zestawiono w tablicy 5, dla parametru C w tablicy 6 oraz dla parametru E w tablicy 7 dla ośmiu wereji formuły (83). Analiza wyników zebranych w tablicach 5, 6, 7 wskazuje na silną zależność parametrów X, od liczby kryterialnej K oraz wyraźnie słabszą zależność od liczby K mimo, że dla wszystkich wereji wartości współczynnika r pozwalają odrzucić hipotezę e braku korelacji [49]. Słaba zależność parametrów X, od liczby K może wynikać z ograniczonego zakresu wartości liczby K w eksperymencie. Może ona również wynikać z nielstotnego wpływu liczby K na parametry charakterystyczne X, na co zwrócomo uwagę we wstępie do niniejszego rozdziału. Biorgo pod uwagę wartość współczynnika korelacji r , sumy kwádratów odchyleń s j oraz wynikającej z niej oceny s jo błędu średniego typowego pomiaru

Ta	b11	OR	6
----	-----	----	---

						Prove la	1 4 4
Wers ja	*2	<sup>b</sup> 2	°2	d2	f2	r <sub>2</sub>	*2
	1,284 . 10 <sup>10</sup>	- 10,453	0,323	- 0,252	962	0,659	9,527
2	7,197 . 10 <sup>20</sup>	- 19,795	0,607	- 0,105	0	0,660	9,640
3	4,347 . 10 <sup>27</sup>	- 25,919	0,810	0	0	0,631	9,830
24	2,626 . 10 <sup>-4</sup>	2,287	0	0	0	0,511	11,481
5	9,467 . 10 <sup>-3</sup>	0,217	0	- 0,386	1720	0,652	9,610
6	1,708 . 10 <sup>-2</sup>	0	0	- 0,406	1725	0,653	9,576
7	9,268 . 10 <sup>-2</sup>	0,	0	- 0,243	0	0,640	9 <b>,9</b> 83
8	4,658 . 10 <sup>-2</sup>	0,251	0	- 0,221	0	0,641	10,022

Vartości stałych ucgólnionej zależności (83) parametru C od liczb podobieństwa K<sub>1</sub> i K<sub>2</sub>

Tablica 7

.2

		ba	0.9	d.3	13	r3	3
Versja	*3		111	1 202	3075	0,820	0,471
1	3,374 . 10 <sup>10</sup>	- 14,463	0,371	- 1,200			0.468
1943	9 463 - 1038	- 38,969	1,111	- 0,783	0	0,813	0,400
2	0,403		2,817	0	0	0,683	0,602
3	4,209 . 1097	- 91,736	*10.1		0	0,464	0,620
4	2,787 . 10-12	6,749	0	-			0,469
13	3.334 . 10-4	- 2,185	0	- 1,362	4041	0,820	
,	-7	0	0	- 1,162	3943	0,793	0,506
6	9,228 . 10	1	1	- 0,826	0	0,782	0,485
7	3,184 . 16-5	0		-		0.804	0,450
8	9,890 . 10-3	- 2,098	0	- 1,009	0		1

Vartości stałych ucgólnionej zależności (83) parametru E od liczb podobieństwa K<sub>1</sub> i K<sub>2</sub>

- 53 -

- 52 -

Versja	*2	<sup>b</sup> 2	°2	d <sub>2</sub>	f <sub>2</sub>	r <sub>2</sub>	•2
• 1	1,284 . 10 <sup>10</sup>	- 10,453	0,323	- 0,252	962	0,659	9,527
2	7,197 . 10 <sup>20</sup>	- 19,795	0,607	- 0,105	0	0,660	9,640
3	4,347 . 10 <sup>27</sup>	- 25,919	0,810	0	0	0,631	9,830
4	2,626 . 10 <sup>-4</sup>	2,287	0	0	0	0,511	11,481
5	9,467 . 10 <sup>-3</sup>	0,217	0	- 0,386	1720	0,652	9,610
6	1,708 . 10 <sup>-2</sup>	O	0	- 0,406	1725	0,653	9,576
7	9,268 . 10 <sup>-2</sup>	0,	0	- 0,243	0	0,640	9,983
8	4,658 . 10 <sup>-2</sup>	0,251	O	- 0,221	0	0,641	10,022

Wartości stałych uogólnionej zależności (83) parametru C od liczb podobieństwa K<sub>1</sub> i K<sub>2</sub>

Tablica 7

Tablica 6

Versja	a.3	b3	°3	d 3	r <sub>3</sub>	r <sub>3</sub>	*3
1	3,374 . 10 <sup>10</sup>	- 14,463	0,371	- 1,202	3075	0,820	0,471
2	8,463 . 10 <sup>38</sup>	- 38,969	1,111	- 0,783	0	0,813	0,468
3	4,209 . 10 <sup>97</sup>	- 91,736	2,817	o	O	0,683	0,602
4	2,787 . 10 <sup>-12</sup>	6,749	0	0	0	0,464	0,620
5	3,334 . 10 <sup>-4</sup>	- 2,185	0	- 1,362	4041	0,820	0,469
6	9,228 . 10 <sup>-7</sup>	0	0	- 1,162	3943	0,793	0,506
7	3,184 . 18 <sup>-5</sup>	0	0	- 0,826	0	0,782	0,485
8	9,890 . 10 <sup>-3</sup>	- 2,098	0	- 1,009	0	0,804	0,450

Vartości stałych uogólnionej zależności (83) parametru E od liczb podobieństwa K<sub>1</sub> i K<sub>2</sub> - 52 -

- 53 -

Tablica 8

1

Wartości stałych uogólnionej zależności  $X_j = a_j \cdot K_2^{-j}$ 

- 55 - -

wyznaczone metodą rachunku wyrównawczego

x,	•,	dj
	418.7 + 35.5	0,793 ± 0,009
A	0.116 + 0,002	- 0,222 ± 0,002
C	(a h(s + 0, h00) + 10 <sup>-5</sup>	- 0,738 ± 0,007
E	(7,405 ± 0,4007	to 144, 1 ma lands and 1, 201 at

Tablica 9

stałych uogólnionej zależności 
$$X_j = a_j K_j K_j$$
  
wyznaczone metoda rachunku wyrównawczego

-	the last of the second value of the	sand an by a build which a	dj
xj	-1		0.920 + 0.023
*	9,247 ± 5,379	1,427 ± 0,210	allet 7 .1 .
	0.02hh + 0.0043	0,493 ± 0,063	- 0,205 ± 0,006
C	0'ores T otoria		- 0.971 + 0.024
E	0,0301 ± 0,0189	- 2,284 ± 0,220	

Vartości

the second second of the second secon

interior applicant reads (100) villation (100 interiminally viewerse interiminally vie

$$p = \frac{n_1}{\sqrt{n-m}},$$
 (85)

gdzie m oznacza ilość stałych w wersji równania (83), stwierdzono, że najlepsze uogólnienie parametrów X, ma postać (wersja 7)

$$\mathbf{x}_{\mathbf{j}} = \mathbf{a}_{\mathbf{j}} \mathbf{K}_{\mathbf{2}}^{\mathbf{d}}$$
(86)

. Do dalszej weryfikacji obok formuły (86) wziężo również pod uwagę wersję 8

$$K_{j} = a_{j}K_{1}^{b_{j}} \cdot K_{2}^{j},$$
 (87)

która ustępuje pod względem jakości wersji 7 (równanie (86)),lecz zawiera obok  $K_2$  liczbę K. Dodatkową zaletą wersji 7 i 8 jest ich prostota.Dla uściślenia wartości stałych empirycznych wersji 7 i 8 uogólnienia oraz oceny ich błędów wykorzystano metodę rachunku wyrównawczego przedstawioną w pracy [51] oraz zaadoptowano program obliczeń udostępniony przez autorów. Jako wartości startowe poszukiwanych stałych empirycznych wykorzystano wyniki uzyskane metodą najmniejszych kwadratów.

Obliczone wartości stałych oraz oceny ich błędów zestawiono w tablicy 8 - dla uogólnienia w postaci (86) i w tablicy 9 - dla uogólnienia w postaci (87). Przy ocenie uzyskanych wyników zwraca uwagę fakt znacznego wsrostu błędów stałych, towarzyszącego obecności liczby K<sub>1</sub> w formule (87). Błędy te wynoszą odpowiednio:

- dla parametru A:	δa <sub>1</sub> = 58,2% δb	1 = 14,7%	δd <sub>1</sub> = 2,5≸
- dla parametru C:	δm2 = 17,6% δb	2 = 12,7%	6d <sub>2</sub> = 3,1%
- dla parametru E:	δa3 = 61,2% δb	3 = 9,6\$	8d3 = 2,4%
Natomiast dla formuly	(86) blędy są znacz	nie mniejsze:	

-	dla	parametru	Ar	δa. =	8,5%	δd <sub>1</sub> =	1,1%
-	dla	parametru	C:	8=2 =	2,1%	δd <sub>1</sub> =	1,0%
-	dla	parametru	E:	6a. =	5,4%	δd, ≖	0,9%.

Vyniki te potwierdzają uprzednio wyciągnięty wniosek,że najlepsze uogónienie stanowi formuża (86) oraz, że liczba K<sub>2</sub> zawiera wystażczającą ilość informacji o warunkach brzegowych wpływających na profil temperatury w płomieniu.

a .10 S modifier

4. OCENA UOGÓLNIONEJ TEMPERATUROVEJ CHARAKTERYSTYKI DYFUZYJNYCH PLOMIENI GAZOWYCH

Przedstawiony model dyfuzyjnych płomieni gazowych, w postaci ich uogólnionej charakterystyki temperaturowej, może służyć do przewidywania profilu temperatury w osi płomienia dla danych warunków brzegowych. Można więc oceniać wpływ zmiany poszczególnych warunków brzegowych (np. rodzaj paliwa, podgrzanie substratów, stosunek nadmiaru powietrza, obciążenie palnika itd.) na temperaturę w płomieniu. Charakterystyka ta umożliwia również racjonalne projektowanie nowych palników i modernizowanie palników istniejących. W tym rozdziałe dokonano porównania temperatur obliczonych według opracowanej charakterystyki płomieni z nielicznymi pełnymi wynikami pomiarów płomieni zamieszczonymi w literaturze. Wykonano też obliczenia profili temperatury dla płomieni w różnych warunkach brzegowych dla porównania wyników z doświadczeniem badaczy i użytkowników palników.

#### 4.1. <u>Ocena klędu temperatury plomienia obliczonej</u> na podstawie uogólnienej charakterystyki

Although the Although and a start of the area which have been a start of the start

Dla oceny jakości opracowanego uogólnienia wykonano obliczenia błędu temperatury maksymalnej w 4 płomieniach opisanych wartościami liczby K<sub>2</sub> = = 2 . 10<sup>-5</sup>, 1 . 10<sup>-4</sup>, 3,5 . 10<sup>-4</sup> obejmującymi zakres badawczy oraz wartością K<sub>2</sub> = 7 . 10<sup>-4</sup> stanowiącą kres obszaru liczb K<sub>2</sub> spotykanych w praktyce.

Wartości parametrów X wyznaczono z formuły (86) przyjmując stałe a j d z tablicy 8. Błędy obliczonych wartości X oceniono według prawa przenoszenia błędów

$$X_{j} = X_{j} \sqrt{\left(\frac{\Delta n_{j}}{n_{j}}\right)^{2} + \left(\ln K_{2} \cdot \Delta d_{j}\right)^{2}}$$
 (88)

Po określeniu współrzędnej  $\mathbb{R}_{\max}^{\#}$  (równanie (35a)) maksymalnej temperatury w płomieniu obliczono jej zredukowaną wartość  $\Im$  z równania (35) przyjmując dla wszystkich przypadków  $\Im_{\mathbf{r}} = 0$ ,  $\Im_{\mathbf{w}} = 0,380$  ( $\mathbf{t}_{\mathbf{r}} = \mathbf{t}_0 = 25^{\circ}$ C,  $\mathbf{t}_{\mathbf{w}} = 800^{\circ}$ C,  $\mathbf{t}_{\mathbf{k}} = 2064^{\circ}$ C). Błąd zredukowanej temperatury maksymalnej  $\Delta \Im$  obliczono z równania (89)

 $\Delta \Theta = \sqrt{\sum_{j=1}^{3} \left(\frac{\partial \Theta}{\partial X_j} \cdot \Delta X_j\right)^2}, \qquad (89)$ 

przy czym pochodne 00/0X wyznaczono z wzorów (90), (91), (92)

20 24

$$= \frac{CE}{(A - E)^2} \left[ \frac{(A - E)A}{E} \cdot R^*_{max} - AR^*_{max} - AR^*$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial C} = \frac{A}{A - E} \left( e^{-ER_{\max}^{\psi}} - e^{-AR_{\max}^{\psi}} \right)$$
(91)

$$\frac{\partial \Theta}{\partial E} = \frac{AC}{(A - E)^2} \left( e^{-ER\frac{\Theta}{MAX}} - e^{-AR\frac{\Theta}{MAX}} \right)$$
$$- \frac{R_{MAX}}{R_{MAX}} \left[ \frac{AC}{A - E} - (\Theta_{W} - \Theta_{Y}) \right] e^{-ER\frac{\Theta}{MAX}}$$
(92)

Następnie obliczono temperaturę maksymalną t z równania

$$\mathbf{t} = \boldsymbol{\Theta} \left( \mathbf{t}_{\mathbf{k}} - \mathbf{t}_{\mathbf{0}} \right) + \mathbf{t}_{\mathbf{0}}$$
(93)

oraz ocenę At blędu temperatury t z równania

(94)

Wyniki obliczeń zestawione w tablicy 10 wskazują, że wartości błędu  $\Delta t$ są równe lub mniejsze od średniego odchylenia  $\Delta t_1 = 40$  K, które wyznaczono przy ocenie jakości dopasowania równania (35) do wyników pomiarowych (punkt 3.3). Świadczy te o dobrej jakości formuły (86). Podobnie przyjmując typową dla warunków eksperymentu wartość liczby K<sub>1</sub> = 35, wykonano obliczenia temperatury maksymalnej i oceny jej błędu, przy czym wartości parametrów X<sub>1</sub> wyznaczono z formuły (87) dla stałych a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, d<sub>1</sub> zamieszczonych w tablicy 9, zaś błędy  $\Delta X_j$  parametrów X<sub>1</sub> obliczono z równania (95)

 $\Delta t = \Delta \Theta (t_k - t_0)$ 

$$\Delta X_{j} = X_{j} \sqrt{\left(\frac{\Delta n_{j}}{n_{j}}\right)^{2} + \left(\ln K_{j} \Delta b_{j}\right)^{2} + \left(\ln K_{2} \Delta d_{j}\right)^{2}}$$
(95)

- 58 -

Tablica 10

Ocena blędu temperatury maksymalnej w płomieniu wyznaczonej według formuły (86)

K <sub>2</sub>	2.10 <sup>-5</sup>	1 . 10-4	3,5 . 10 <sup>-4</sup>	7 . 10-4
	0,079	0,282	0,761	1,319
ΔΑ	0,010	0,033	0,084	0,140
C	1,282	0,897	0,679	0,582
AC	0,041	0,026	0,019	0,015
E	0,220	0,067	0,027	0,016
ΔE	0,020	0,005	0,002	0,001
R <sup>#</sup> ma.x	10,301	8,501	5,624	4,184
θ	0,584	0,724	0,649	0,573
Δ0	0,021	0,020	0,016	0.014
t °C	1216	1501	1348	1194
At K	42	41	34	30

Tablica 11

Ocena blędu temperatury maksymalnej plomienia wyznaczonej według formuły (87) dla K = 35

<u>к</u> 2	2. 10-5	1 . 10 <sup>-4</sup>	3,5.10-4	7 10-4
A	0,070	0,310	0,980	1,854
ΔΑ	0,069	0,300	0,945	1,782
C	1,294	0,931	0,720	0,625
ΔC	0,379	0,270	0,208	0,180
E	0,329	0,069	0,020	0,010
AE	0,341	0,071	0,021	0,011
R	8,792	7,832	4,794	3,315
0	0,529	0,750	0,695	0,618
40	0,150	0,212	0,192	0,174
t °C	1104	1555	1443	1286
At K	306	432	392	356

Wyniki obliczeń, zebrane w tablicy 11, wskazują, że oceny błędu  $\Delta t$  około 10-krotnie przewyższają średnie odchylenie  $\overline{\Delta t}_1 = 40$  K (punkt 3.3), co właściwie dyskwalifikuje ucgólnienie w postaci formuły (87).

### 4.2. Porównanie wyników obliczeń z danymi pomiarowymi

W literaturze znajduje się mało danych z pomiarów temperatury w płomieniach, a te, które zostały opublikowane, są zazwyczaj niekompletne,brak jest szczególnie pełnej informacji o warunkach brzegowych i oceny błędu mierzonej temperatury.

W pracy [44] podano dość szczegółowo (z wyjątkiem temperatury ścian komory spalania) wyniki badań płomieni gazu ziemnego zrealizowanych za pomocą palnika dyfuzyjnego, z którego strugi gazu i powietrza wypływają równolegle i oddzielone są przy wypływie strugą tlenu stosowaną do stabilizacji plomieni. Ze względu na równoległość strug, stosowane paliwo i tlen do stabilizacji jest to przypadek dość odległy od badanych w pracy. Tym niemniej, ze względu na brak innych, wykorzystano go do porównania. Wyniki zawarte w pracy [44] dotyczą płomieni zrealizowanych przy trzech różnych wartościach prędkości wypływu powietrza z palnika w = 5,33, 15,37 1 26,88 m/s oraz stałej prędkości wypływu gazu w = 52,6 m/s. Temperatura substratów wynosiła  $t_r = 20^{\circ}C$ , temperatura kalorymetryczna paliwa wynosila  $t_k = 2064^{\circ}C$ , a wartość opalowa  $W_d = 37 982 \text{ kJ/kg.W obliczeniach}$ przyjęto  $t = 500^{\circ}C$  (informacje na ten temat nie były w pracy ścisłe). V tablicy 12 podano wartości liczb kryterialnych oraz obliczonej ze wzoru (93) średniej temperatury t i średniej temperatury t wynikającej z pomiarów w osi płomieni. Przy obliosaniu średniej temperatury t w miejsce 8 do wzoru (93) podstawiono wartość 8 otrzymaną z całkowania równania (35):

$$\overline{\Theta} = \frac{1}{R_{k}^{\Theta}} \left[ \frac{1}{E} \left[ \frac{CA}{A - E} - (\Theta_{w} - \Theta_{x}) \right] (1 - e^{-ER_{k}^{\Theta}}) - \frac{C}{A - E} (1 - e^{-AR_{k}^{\Theta}}) \right] + \Theta_{w}, \quad (96)$$

gdzie przez R<sup>6</sup> oznaczono zredukowaną odległość ostatniego punktu pomiarowego od wylotu palnika. Obliczenia wykonano korzystając z uogólnienia w postaci (86) i (87). Wyniki obliczeń t uzyskane za pomocą formuły (86) wykazują odchylenia od wartości zmierzonych t<sub>z</sub> w granicach 16;22%, natomiast wyniki uzyskane za pomocą formuły (87) przewyżezają wartości pomiarowe o 40:130%.

- 59 -

	1	$x_{j} = a_{j} x_{2}^{d_{j}}$	(86)	X, = a	k J <sub>K</sub> dJ	1011
~	20	52,6			2	(10)
Ī				52,6	150 - 151.	
	5,33	15,37	26,88	5,33	15.37	as ye
	-	-		4.72	to t	no los
		101010	1	1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 -	01/0	66,3
	0,323	1,443	3,611	0,323	P.44.1	
-0		11 1 2 2	A S A S A			3,011
+		504	1 004	1 119	904	1 004
	875	1 054	1 168	1 568	2 083	1 889

W tablicy 13 przedstawiono porównanie wyników podobnie wykonanych obliczeń z wynikami pomiarów jednego płomiania [29] zrealizowanego za pomoccą palnika 65/125z typu Biprohut (5,5 razy większa moc w porównaniu z palnikiem stosowanym w badaniach eksperymentalnych), zasilanego gazem koksowniczym i wyposażonego w zawirowywacz powietrza. Zawirowanie strugi powietrza wypływającej z palnika uwzględniono przy obliczaniu prędkości w powietrza. W wyniku zastosowania formuły (86) uogólnienia obliczona temperatura maksymalna t w osi płomienia była o ok. 4% niższa od zmierzonej t z dobliczena temperatura średnia  $\overline{t}$  była o 3,5% wyższa od wartości  $\overline{t}_{z}$  wynikającej z pomiarów. Wykorzystanie formuły (87) do obliozeń dało wyniki wyższe odpowiednio o 18 i 31,4%. Tak więc porównanie z wynikami pomiarów również wskazuje, że uogólnienie parametrów charakterystycznych profilu temperatury w osi płomienia w postaci formuły (86) jest dokładniejsze aniżeli formuła (87).

- 61 -

Tablica 13

#### Porównanie wymików ebliczeń z danymi pomiarowymi [29]

Formula	$X_j = a_j K_2^{d_j}$	(86)	$x_j = a_j K_1^{b} J K_2^{d} J$	(87)
v. =/*	20,2	-	20,2	
¥a m/s	25,1		25,1	
K <sub>1</sub>			46,5	
10 <sup>4</sup> . K <sub>2</sub>	3,106	+	3,106	
tmax z °C	1 475		1 475	+
t <sub>max</sub> <sup>o</sup> c	1 415		1 740	
Ē <sub>z</sub> °c	1 243		1 243	
ī °c	1 286		1 633	

W tablicy 14 zamieszczono porównanie obliczonej, za pomocą formuły (86), średniej temperatury  $\bar{t}$  w osi z wartością  $\bar{t}$  wynikającą z pomiarów [64] 6 płomieni zrealizowanych za pomocą palnika 80/80 typu Biprohut z zawirowywaczem powietrza, Poszczególne płomienie uzyskano dla mieszanek gazowych (gaz koksowniczy + wielkopiecowy) o zmiennej wartości opałowej (od 7 do ok. 14 NJ/m<sup>3</sup>) przy zachowaniu warunku stałej mocy palnika V ...  $W_d = idem.$ Z tablicy 14 wynika, że obliczone wartości  $\bar{t}$  przewyższają o kilkanaście

kJ/m <sup>3</sup>	2 000	9 020	10 130	11 150	12 780	13 800
00	1 757	1 836	1 887	1 923	1 951	1 074
. 0 <sub>0</sub>	780	810	820	240	800	820
=/=	8,1	5,4	4.6	4,2	3,5	
m/a .	22,2	19,61	4,91	21,2	4.61	4 04
• K2	1,340	1,032	1,042	1.761		
0° .	575	126 .	1 034	1 000	011.1	1,126
00	1 090	1 146	1 174	1 158	1 194	1 089

- 62 -

procent wartości t wynikające z pomiarów, przy czym dość dobrze zachowana jest w wynikach obliczeń prawidłowość ujawniona w pomiarach, polegająca na wzroście średniej temperatury płomienia wraz ze wzrostem wartości opałowej paliwa gazowego. Wynik porównania byłby jeszoze lepszy,gdyby poprawka mierzonej temperatury ze względu na promieniowanie spoiny termopary została precyzyjniej określona w pracy [64], wydaje się bowiem, że poprawkę tę oceniono zbyt nisko.

- 63 -

W tablicy 15 porównano wyniki obliczeń temperatury maksymalnej  $t_{max}$  i średniej  $\tilde{t}$  w osi z wynikami pomiarów  $t_{max}$  i  $\tilde{t}_{g}$  dwóch różnych płomieni zrealizowanych za pomocą palników wirowych typu Biprohut, zasilanych gazem kopalnianym [40] i gazem mieszanym (ziemny + czadnicowy) [39].W obydwóch przypadkach substraty były zimne ( $t_{g} = t_{a} = 25^{\circ}$ C).W pierwszym przypadku obliczona temperatura maksymalna przekracza o 2% zmierzoną, zaś obliczona średnia temperatura jest ok. 18% wyższa od zmierzonej. W drugim przypadku wyniki obliczeń były niższe odpowiednio o 6% i 1,5% od wartości uzyskanych podozas pomiarów.

Tablica 15

#### Porówianie wyników obliczeń z danymi pomiarowymi

Dane pomiarowe	z pracy [40]	5 pracy [39]
Gaz	kopalniany	ziemy + czadnicowy
W <sub>d</sub> kJ/m <sup>3</sup> n	26 850	12 996
t <sub>k</sub> <sup>o</sup> C	2 018	1 929
tw oC	677	561
w <sub>g</sub> m/s	18,0	3,5
w <sub>a</sub> m/s	14,0	13,5
10 <sup>4</sup> K <sub>2</sub>	0,757	0,442
t oC	1 377	1 272
t <sub>max</sub> °c	1, 404	1 192
t <sub>z</sub> °c	990	928
t °c	1 173	915

Na podstawie przedstawionego porównania temperatur obliczonych metoda opracowaną przez autora, z temperaturami zmierzonymi w 10 płomieniach zrealizowanych w warunkach (wartość opałowa gazu, zawirowanie powietrza) dość istotnie różniących się od warunków, przy których badano płomienie w niniejszej pracy, można stwierdzić, że opis prefilu temperatury w osi płomienia i opracowane na podstawie danych pomiarowych uogólnienie tego opisu jest dokładne oraz, że liczba podobieństwa K, zawiera ilość informacji o warunkach brzegowych wystarczającą do opisu profilu temperatury w osi plomienia.

#### 4.3. Przykłady wykorzystania modelu dyfuzyjnego płomienia zazowege do analizy wpływu parametrów substratów na jakość płomienia

Przedstawione w tym punkcie przykłady praktycznego wykorzystania uogólnionego opisu temperatury w dyfuzyjnych plomieniach gazowych (modelu dyfuzyjnych płomieni gazowych) wskazują na możliwości jakie stwarza proponowana metoda, konkretne zaś wyniki obliczeń, porównywalne z doświadczeniem badaczy i użytkowników palników gazowych, przekonują o dobrej jakości uzyskanego uogólnienia. Wszystkie prezentowane dalej obliczenia wykonano na bazie formuly (86).

#### 4.3.1. Stosunek nadmiaru powietrza do spalania

Optymalne wartości stosunku 2 nadmiaru powietrza do spalania dla poszczególnych paliw znane są od dawna i ocenione zostały na podstawie bilansów energetycznych palenisk. Tutaj dla konkretnego palnika (A\_ = = 2,017 .  $10^{-4} \text{ m}^2$ , A = 8,884 .  $10^{-4} \text{ m}^2$ ) zasilanego zimnym gazem koksowniczym (t =  $25^{\circ}$ C) i zimnym powietrzem (t =  $25^{\circ}$ C) wykonano przykladowe obliczenia temperatury maksymalnej t\_\_\_\_i średniej t w osi płomieni uzyskanych przy stosunku 2 = 0,7;2,0 i przedstawiono na rysunku 11a. Na podstawie temperatury średniej  $\overline{t}$  (t = 800°C, t<sub>0</sub> = 25°C) oceniono za pomocą wzoru (10) wpływ stosunku 2 na wskaźnik w oszczędności paliwa (rys. 11b), przyjmując jako stan odniesienia wartość 2 = 1,15, która odpowiada maksymalnej wartości temperatury t. Zaprezentowane wyniki świadczą o dobrej jakości opracowanego modelu płomienia, bo np.największa wartość maksymalnej temperatury plomienia t występuje dla  $\lambda = 1,0$ , a nawet częściowo wyjaśniają zalecane w praktyce spalania wartości  $\lambda > 1$ . Wtedy bowiem (tu  $\lambda = 1,15$ ) najwyższą wartość osiąga średnia temperatura plomienia, co odpowiada maksymalnej sprawności 2 (równanie (12)) paleniska. Widoczne jest również (rys. 11b), że w przedziale A = 1,05-1,3, wpływ stosunku 2 na zużycie paliwa jest znikomy, dla rozważanego paliwa i palnika. Dla innych paliw oraz palników optymalna wartość stosunku A może być nieco inna, možna ja ocenić sa pomoca przedstawionej w pracy metody.



Rys. 11. Wpływ stosunku nadmiaru powietrza na temperaturę płomienia i wskaźnik eszczędności paliwa

### 4.3.2. Oboiatenie palnika

Każdy palnik zaprojektewany jest dla skreślonego obciążenia neminalnego (V V.), przy którym powinien działać najlepiej. Wiadomo, że działanie palnika przy obciążeniu V W niższym lub wyższym od obciążenia nominalnego jest gorsze, ale nie wiedomo o ile. Prezentowany model płomieni gazowych pozwala dekonać ilościewej oceny wpływu obciążenia palnika na jego działanie. Dla palnika z peprzedniego przykładu wykonano obliczenia temperatury maksymalnej t i średniej t w osi płomienia dla obcią-żenia  $V_g V_d$  stanowiącego od 50-170% ebeiążenia neminalnego  $(V_g V_d)_N$ (rys. 12a). Ze wzoru (12) wyznaczono sprawność termiczną ? komory spalania ( $t_u = 800^{\circ}$ C,  $t_0 = 25^{\circ}$ C) (rys. 12b) przy załeżeniu, że sprawność komory przy nominalnym obciążeniu palnika wynosi 7 t0 = 20%. Analizowany palnik posiada dość płaską oharakterystykę obciążeniową w zakresie 80-120% mocy nominalnej. Stosowanie ebciążeń spoza tege przedziału pociąga za sobą spadek sprawności paleniska nawet o 2%, czemu towarzyszy zwiększenie wartości wskaźnika jednostkowego zużycia paliwa o 8:10% (rys. 4).





#### 4.3.3. Zmiana paliwa gazowego

Uogólniony opis profilu temperatury w plomieniach gazowych może być pedstava do analisy, której celem byloby określenie warunków (parametry substratów, ocohy konstrukcyjne palnika) niesbednych dla sachowania stałej charakterystyki palnika po dokonaniu smiany paliwa (skład chemiosny, wartość opalowa). Przed takim problemem stoją ozęsto użytkownicy palników, szczególnie w zakładach, których gospodarka paliwowa opiera się na kilku paliwach gazowych. Nie rozwijając zzerzej zagadnienia, dla zilustrowania konsekvencji zmiany paliwa, przesnalizowano przypadki, w których palnik z poprzednich przykładów przystosowany do spalania gazu koksowniczego, zasilano gazem ziemnym, kopalnianym oraz gazami mieszanymi, przy zachowaniu warunku stałego obciążenia V. V. = idem. Vyniki obliczeń temperatury mak-symalnej t<sub>max</sub> i średniej t w osi płomienia, wskaźnika oszczędności palive  $\omega$  (t = 800°C, t = 25°C) oras wielkości pomocniczych zamieszczono w tablicy 16. Wyniki te wskazują, że zmiana paliwa bez zmian parametrów substratów lub cech konstrukcyjnych palnika pociągnie sa sobą werost sużycia paliwa, który w przedstawionym przykładzie wynosi od 1,6% dla gażu ziemego do 6,6% dla mieszanki II gazu ziemego z gazem ozadnicowym, niezbędny dla osiągnięcia takiego samego efektu użytecznego.



- 67 -



Rys. 13. Wpływ temperatury powietrza do spalania na profil temperatury W osi płomienia gazu koksowniczego Oczywiście charakterystyki różnych palników ze względu na stosunek  $\lambda$ , obciążenie czy też rodzaj paliwa gazowego mogą się różnić między sobą, bo nie istnieją uniwersalne charakterystyki palników ze względu na wielkości tu analizowane. Jednakże znajomość tych charakterystyk przez praktyków byłaby bardzo pożądana dla racjonalnego użytkowania paliw gazowych. Niestety producenci palników nie podają takich charakterystyk swoich wyrobów.

- 69 -

#### 4.3.4. Temperatura substratów

Wpływ podgrzewania substratów na działanie pieców grzewczych jest obszernie przeanalizowany w literaturze [50]. Tutaj przedstawiono wpływ temperatury  $t_a$  powietrza do spalania gazu koksowniczego (t = 25°C) na profil temperatury w osi płomieni, uzyskanych za pomocą palnika z poprzednich przykładów, przy zachowaniu warunku

$$\dot{v}_{g}(w_{d} + \lambda n_{a \min} \cdot i_{a}) = idem$$
 (97)

stałego strumienia energii doprowadzonej do komory spalania. Obliczone za pomocą modelu profile temperatury (rys. 13) w płomieniach wskazują na wzrost szybkości spalania (zbliżanie się maksimum temperatury do wylotu palnika), towarzyszący wzrostowi temperatury t powietrza oraz na wzrastającą ze wzrostem t efektywność podgrzewania powietrza.



#### Rys. 14. Wpływ udziału tlenu w powistrzu do spalania na temperaturę płomienia i wskaźnik oszczędności paliwa

Dia painika z poprzednich przykładów analizowano wpływ udziału tlenu 0<sub>2e</sub> w powietrzu do spalania gazu koksowniozego, przy zachowaniu stalego stosunku  $\lambda = 1,07$ , zimnych substratach  $(t_g = t_a = 25^{\circ}C)$ i temperaturze ácian komory spalania t. = 800°C. Wyniki obliczeń temperatury makaymalnej t i średniej t w zależności od udziału tlenu 0 w powietrzu, w zakresie 0<sub>2a</sub> = 0,21:0,28, przedstawiono na rysunku 14a. Oceniono też, za pomocą wzoru (10), wskaźnik oszczędności paliwa (rys. 14b) w zależności od wartości 0<sub>20</sub>. Wyniki obliczeń wskaźnika ω(np.dla 0, = = 24% w = 5%) wskazują,że oszczędność paliwa uzyskana poprzez wzrost

4.3.5. Udział tlenu w powietrzu do spalania

- 68 -

udziału tlenu w powietrzu do spalania jest mała i zgadzają się z praktyką, która w piecach grzewozych nie stosuje wzbogaconego powietrza.

~ 70 -

Zaprezentowane w tym punkcie przykłady analizy wpływu parametrów substratów na temperaturę płomienia, sprawność paleniska i wskaźnik oszczędności paliwa dają wyniki, które dobrze zgadzają się z doświadczaniem i wskazują na dużą użyteczność praktyczną opracowanego modelu (charakterystyki temperaturowej) dyfuzyjnych płomieni gazowych.

An And Antice Section of the section

1491

have a list - we we - when

atoriage atractication and a sequence of a same part in this second and a second and a second and a second a se

and dependence of an other said

and any of a part of the set of any of a set of



5. OPTYMALIZACJA DYFUZYJNYCH PALNIKÓW GAZOWYCH O UMIARKOWANYCH PREDKOŚCIACH WYPŁYWU SUBSTRATÓW

on valies of a long the remains a bulk to a still reary the anishing of

says had you will be in the second of the second state of the second second second

Spoáród licznych parametrów substratów spalania za pomocą dyfuzyjnego palnika gazowego organizewane są jedynie predkości, a ściślej składowe predkości wypływu gazu i powietrza. Struga powietrza na wylecie z palnika zderza się z centralnie usytuowaną strugą gazu, zwykle pod kątem oz = = 20°, który również zachowano w cześci doświadozalnej niniejszej pracy. Struga powietrza jest w umiarkowanym stopniu zawirowana za pomoca lopatek zawirowujących, pochylonych pod kątem A = 20+25° względem osi palnika, który to kat jest najlepszy ze wzgledu na sfektywność zawirowania mierzeną stosunkiem przyrostu gestości egzerii fizycznej płomienia do przyrostu gestości egzergii fizycznej substratów [57, 58]. Nie zawirowuje się strugi gazu, ponieważ strumień gazu jest znacznie mniejszy od strumienia powietrza i efekt zawirowan a jest od kilku do kilkunastu razy mniejszy w porównaniu z efektem zawirowania strugi powietrza. Zachowując więc kąt o spotkania strug i kat & pochylenia lopatek zawirowywacza doskonalić należy wartości osiowych składowych prędkości wypływu gazu w i powietrza w \_ \_ painika, ozyli poszukiwać optywalnych pół przekrojów wylotowych dyszy gazu A i dyszy powietrza A przy określonym obciążeniu palnika.

Na fakt istnienia takiej optymalnej pary wartości prędkości wypływu gazu i powietrza dla określonego palnika i paliwa wskazują wyniki cytowanych już badań palników oraz wyniki doświadczalne uzyskane w tej pracy.Ponieważ mechanizm dyfuzji turbulentnej nie jest jeszcze w pełni poznany można tu jedynie próbować fakt ten fizykalnie objaśnić. Przy małych prędkościach wypływu substratów intensywność dyfuzji jest niska,spalanie jest przewlekłe i odbywa się przy stosunkowo niskich wartościach temperatury w płomieniu (rys. 8) przez co strumienie ciepła przekazywane od płomienia i spalin do ścian komory, zarówno przez promieniowanie jak i przez konwekcję, nie są zbyt duże.

W miarę wzrostu prędkości wypływu substratów z palnika rośnie intensywność dyfuzji i spalania, rosną temperatury w płomieniu (rys. 8), a położenie temperatury maksymalnej zbliża się do wylotu palnika. Rośnie więc intensywność przekazywania ciepła od płomienia i spalin do ścian komory spalania.

Dalszemu wzrostowi prędkości wypływu substratów z palnika towarzyszy dalsze przesuwanie się temperatury maksymalnej do palnika. Jednakże, przypuszczalnie na skutek wzrestu dyfuzji chłodniejszych spalin do płomienia, poziom temperatury w płomieniu ulega obniżeniu, a intensywność przekazywania ciepła zaczyna maleć. Optymalizacja prędkości wypływu substratów polegałaby na poszukiwaniu takiego stanu, w którym intensywność mieszania się substratów jest duża a równocześnie intensywność rozoieńczania gazów płomieniowych spalinami nie wpływa jeszcze na obniżenie poziomu temperatury w płomieniu.

W punkcie 1.4 oceniono wpływ średniej temperatury bryły gazowej w komorze pieca grzewczego na wskaźnik oszczędności paliwa ω .Z oceny tej wynika, że należy dążyć do takiej organizacji spalania, która zapewni uzyskanie jak najwyższej średniej temperatury w piecu. Wniosek ten wykorzystano do sformułowania funkcji celu przy optymalizacji palników. Ze względu na to, że uogólniony opis profilu temperatury został opracowany dla charakterystycznego kierunku pokrywającego się z osią palrika i określonego długością L obszaru przeznaczonego do pomieszczenia płomienia, jako kryterium optymalizacji palników zaproponowano warunek osiągnięcia maksymalnej wartości przez średnią temperaturę wyznaczoną dla tego charakterystycznego kierunku

Vartość średniej temperatury w płomieniu obliczona wzdłuż esi palnika jest z pewnością wyższa od wartości średniej temperatury w całej komorze spalania, co może być przyczyną zbyt pesymistycznej oceny efektu optymalizacji palnika. Jednakże kierumek zmian wymienionych temperatur średnich, spowodowanych zmianami cech konstrukcyjnych palnika, jest taki sam, co stwierdzono analizując uzyskane w pracy dane pomiarowe. Pozwala to oczekiwać, że położenie optimum nie ulegnie zmianie wskutek przyjęcia w warunku (98) średniej temperatury w osi płomienia zamiast temperatury w całej komorze spalania. Varumek tem można wykorzystać do określenia optymalnych prędkości wypływu, a następnie optymalnych wartości pól przekrojów wylotowych dyszy gazu A, i powietrza A, w palniku.

t --- max (98)

#### 5.1. <u>Określenie optymalnych wartości prędkości</u> gazu i powietrza

Jeżeli są dane: rodzaj paliwa ( $\mathbb{W}_d$ ,  $\mathbf{t}_k$ ,  $\mathbf{n}_{a}$  min), temperatury substratów ( $\mathbf{t}_{\vec{b}}$ ,  $\mathbf{t}_{\vec{a}}$ ), temperatura  $\mathbf{t}_{u}$  wsadu w piecu lub ścian komory spalania oraz długość L obszaru, w którym płomień może się rozwinąć,warunek (98) można wyrazić za pomocą zredukowanej temperatury średniej  $\bar{\Theta}$  (równanie (96)) w osi płomienia

property in the property of the property and a property is a like property of

0 --- max (99)

Poszukuje się więc maksymalnej wartości temperatury 🖲 ze względu na prędkości wypływu gazu w i powietrza w z palnika, które można ująć za pomocą liczby kryterialnej K<sub>2</sub>. Z warunku na ekstremum funkcji wynika równanie

$$\frac{d\overline{0}}{dK_2} = \frac{\partial\overline{0}}{\partial A} \cdot \frac{\partial A}{\partial K_2} + \frac{\partial\overline{0}}{\partial C} \cdot \frac{\partial C}{\partial K_2} + \frac{\partial\overline{0}}{\partial E} \cdot \frac{\partial E}{\partial K_2} + \frac{\partial\overline{0}}{\partial R_2^*} \cdot \frac{\partial R_2}{\partial K_2} = 0 \quad (100)$$

Pochodne cząstkowe funkcji 0 podług charakterystycznych parametrów A, C, E i zredukowanej długości R płomienia wynoszą:

1

$$\frac{\partial \overline{\Theta}}{\partial A} = \frac{1}{R_{k}^{*}} \left[ \frac{C}{(A-E)^{2}} - \frac{-ER_{k}^{*}}{A-E} - \frac{C}{A-E} \left( \frac{1}{A-E} + R_{k}^{*} \right) e^{-AR_{k}^{*}} \right], \quad (101)$$

 $\frac{\partial \overline{\Theta}}{\partial C} = \frac{1}{R_{\star}^{0}} \left( \frac{1}{E} - \frac{1}{E} \frac{A}{A-E} \right)^{-ER_{\star}^{B}} + \frac{1}{A-E} \right), \quad (102)$ 

$$\frac{\partial \overline{\Theta}}{\partial E} = \frac{1}{R_{k}^{W}} \left\{ -\frac{C}{E^{2}} \div \frac{\Theta_{w} - \Theta_{w}}{E^{2}} \div \frac{1}{E} \left[ \left( \frac{C}{A - E} - \Theta_{w} \div \Theta_{r} \right) \left( \frac{1}{E} \div R_{k}^{W} \right) - \frac{C}{(A - E)^{2}} \right] \bullet^{-ER_{k}^{W}} \div \frac{C}{(A - E)^{2}} \bullet^{-AR_{k}^{W}} \right\}$$
(103)

$$\frac{\partial \overline{\Theta}}{\partial R_{k}^{*}} = \frac{1}{R_{k}^{*}} \left[ -\frac{C}{ER_{k}^{*}} + \frac{\Theta_{w} - \Theta_{r}}{ER_{k}^{*}} + \left( \frac{C}{A-E} - \Theta_{w} + \Theta_{r} \right) \left( \frac{1}{ER_{k}^{*}} + 1 \right) \right]$$

 $-\frac{C}{A-E}\left(\frac{1}{R_{k}^{*}}+A\right)e^{-AR_{k}^{*}}\right],$ (104)

gdzie parametry A, C, E określone są równaniem (86)

$$x_j = a_j K_2^{a_j}$$

100

Zredukowane dlugoáć R\* plomienia określona jest wyrażeniem

$$R_k^{\#} = \frac{L}{d_0} = L^{\#} \cdot K_2^{0,25}$$
 (105)

Pojawiża się tutz nowa bezwymiarowa wielkość L<sup>#</sup> zdefiniowana równaniem

$$L^{\#} = \frac{L_{10}^{0,25}}{2\sqrt{\frac{\dot{m}_{\#} + \dot{m}_{\#}}{3\rho_{0}}}}$$
(106)

charakteryzująca komorę spalahia (L), obciążenie palnika ( $m_{g} + m_{g}$ ) oraz rodzaj paliwa i temperatury substratów ( $i_{0}$ ,  $\rho_{0}$ ). Wartości stałych  $a_{j}$ ,  $d_{j}$  podane są w tablicy 8. Pochodne parametrów X i długości R podług liczby K, wynoszą

$$\frac{\partial A}{\partial K_2} = \frac{d_1}{K_2} \cdot A$$
 (107)

$$\frac{\partial C}{\partial E_2} = \frac{d_2}{E_2} \cdot C \qquad (108)$$

$$\frac{\partial E}{\partial R_2} = \frac{d_3}{R_2} - E$$
(109)

$$\frac{\partial R_{k}^{*}}{\partial K_{2}} = \frac{0.25}{K_{2}} \cdot R_{k}^{*}$$
(110)

Podstawiając pochodna (101)#(104) oraz (107)#(110) do równania (100) otrzymuje się po przekształceniach równanie

$$\frac{1}{1-x} \left[ \left( \frac{d_3 - d_1}{d_3 + 0,25} + \frac{x}{1-x} - z + \frac{d_2}{d_3 + 0,25} - 1 \right) e^{-z} \right]$$

$$= \left( \frac{d_3}{d_3 + 0,25} + \frac{x^2}{7^2 z} - \frac{d_1}{d_3 + 0,25} + \frac{x}{1-x} + \frac{d_2 + 0,25}{d_3 + 0,25^{+x}} \right]$$

$$= \frac{d_1 - 0,25}{d_3 + 0,25^{+x}} e^{-z} \left[ -\frac{d_2}{d_3 + 0,25} + 1 \right] = \left[ 1 - (1+z)e^{-z} \right] y, \qquad (111)$$

- 75 -

w którym dla uproszczania zapisu oznaczono

$$\mathbf{x} = \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{A}} = \frac{\mathbf{a}_{3}}{\mathbf{a}_{1}} \cdot \frac{\mathbf{x}_{2}^{d} \mathbf{3}^{-d}}{\mathbf{a}_{2}}$$

$$\mathbf{y} = \frac{\mathbf{e}_{w} - \mathbf{e}_{x}}{\mathbf{a}_{2}} = \frac{\mathbf{e}_{w} - \mathbf{e}_{x}}{\mathbf{a}_{2}} \cdot \mathbf{x}_{2}$$

$$\mathbf{z} = \mathbf{E} \mathbf{R}_{w}^{a} = \mathbf{a}_{3} \cdot \mathbf{L}^{a} \cdot \mathbf{x}_{2}^{d}$$
(112)

Po rozwiązaniu, np. metodą prób, układu równań (111), (112) otrzymuje się dla danych warunków brzegowych (L<sup>6</sup>,  $\Theta_W - \Theta_T$ ) wartość liczby sapewniającą uzyskanie maksymalnej wartości średniej temperatury  $\overline{\Theta}$  w osi płomienia. Na rysunku 15 przedstawiono zależność wartości opt od charakterystycznej wielkości. L<sup>5</sup> i różnicy  $\Theta_W - \Theta_T$  zredukowanych temperatur ścian komory spalanie, i substratów. W dolnej części rysunku 15 podano zależność zredukowanej nadwyżki  $\overline{\Theta} - \Theta_W$  temperatury średniej w obi płomienia ponad temperaturę ścian komory spalania od wielkości L<sup>8</sup> i różnicy  $\Theta_W - \Theta_T$ . Z charakteru tej zależności wynika możliwość określenia optymalnej wartości wielkości L<sup>8</sup>, sapewniającej, przy danym  $\Theta_W - \dots$  osiągnięcie najwyższej możliwej wartości różnicy  $\overline{\Theta} - \dots$  Położenie maksimów nadwyżki  $\overline{\Theta} - \Theta_U$  opisuje w przybliżeniu formuła

$$L_{opt} = 60 + 300(0 - 0_r)$$
 (113)

Jeżeli więc długość L obszaru przewidywanego dla rozwinięcia się płomienia nie została woześniej zdeterminowana (np. palenisko już istnieje), to na podstawie formuły (113) i definicji (106) można dobrać optywalną w danych warunkach ( $m_g$ ,  $m_a$ ,  $V_d$ ,  $t_g$ ,  $t_a$ ) wartość L

Tok postępowania przy określaniu optymalnych cech konstrukoyjnych (A A) palnika dla istniejącej komory spalania (wartość L jest dana) jest następujący:

- 1) dla danych  $\nabla_{g}$ ,  $\rho_{g}$ ,  $\nabla_{d}$ ,  $t_{k}$ ,  $t_{g}$ ,  $\rho_{a}$ ,  $t_{a}$ ,  $t_{w}$  należy obliczyć vartość  $\Theta$  z równania (36),  $\Theta_{w}$  z równania (37),  $\rho_{0}$  z równania (55) oraz 1<sub>0</sub> z równania (58),
- 2) dla danego L oblicsyć wartość L<sup>#</sup> z równania (106),
- 3) dla wartości  $L^0$  i  $\Theta_{r} \Theta_{r}$  wyznaczyć wartość  $L_{2 \text{ opt}}$  z wykresu (rys. 15) lub przez rozwiązanie układu równań (111), (112),
- 4) z równania (56), wykorzystując określenie (54) wymnaczyć parę prędkości w<sub>s</sub>, w<sub>a</sub> spełniającą warunak

$$\ddot{u}_{gg} + \dot{m}_{gu} = (\dot{m}_{g} + \dot{m}_{g}) \sqrt{\mathbf{I}_{2 \text{ opt}^{1}}}_{0}$$
 (114)

najlepiej tak by wartości w i w były bliskie VK2 optio



Rys. 15. Nomogram do wywnaczania optymalnej wartości liozby kryterialnej K<sub>2</sub>

The Blog Property of the State of all concerns

5) obliczyć optymalne pola przekrojów wylotowych dycz gazu A i powietrza A z równań

 $A_{g} = \dot{V}_{g}/V_{g}$ 

 $A_{a} = \dot{V}_{a}/w_{a}$ 

- 77 -

(116)

Jeżeli struga powietrza ma być zawirowana, wówozas w równaniu (†16) zamiast w należy podstawić składową osiową w<sub>a1</sub> prędkości powietrza określoną z zależności

$$v_{11} = \frac{v_{11}}{\sqrt{1 + tg^2 \beta}}$$
 (117)

słusznej dla zawirowywaczy łopatkowych.

Jeżeli komora spalania jeszcze nie istnieje, to w punkcie 2 należy określić wartość L<sup>5</sup> z formuły (113) oraz wartość L<sub>opt</sub> z równania (106). Poza tym tok obliczeń pozostaje bez zmian.

Przedstawiona w tym punkcie optymalizacja prędkości wypływu substratów może być podstawą algorytmu do projektowania nowych i badania możliwości modernizacji istniejących palników.

#### 5.2. Przykłady optymalizacji palników

Dla ilustracji zaproponowanej metody optymalizacji palników przedstawiono tu analizę dwóch palników istniejących.

Palnik 65/125 typu Biprohut [11], przy obciążeniu nominalnym zasilany strumieniem v = 77 m<sup>3</sup>/h gazu koksowniczego o wartości opalowej W<sub>d</sub> = = 28 413 kJ/kg, n<sub>a min</sub> = 4,055, t<sub>k</sub> = 2064°C, o temperaturze t<sub>a</sub> = 25°C i gestości  $\rho_{g}$  = 0,54 kg/m<sup>3</sup> oraz powietrzem ( $\lambda$  = 1,1) o temperaturze t<sub>a</sub> = = 25°C, zainstalowany w komorze o długości L = 2,5 m i średniej temperaturze ścian i wsadu t = 850°C. Pola przekrojów dysz gazu i powietrza wynoszą odpowiednio A<sub>g</sub> = 0,001 962 m<sup>2</sup> i A<sub>a</sub> = 0,003 811 <sup>2</sup>. Powietrze jest zawirowywane w zawirowywaczu, którego lopatki tworzą z osią kąt  $\beta$  = 25°. Dla przedstawionych denych wielkości niezbędne do dalszych obliczeń mają wartości: m = 0,011 550 kg/s, m<sub>a</sub> = 0,111 624 kg/s,  $\rho_0$  = 1,055 kg/m<sup>3</sup>, i<sub>0</sub> = 2 666 000 J/kg. W tablicy 17 zestawiono wartości interesujących wielkości dla palnika 65/125 w pierwszej kolumnie, dla optymalnego palnika (przy L = 2,5 m) w drugiej oraz dla optymalnego palnika w komorze o optymalnej długości (L<sub>opt</sub> = 1,731 m) w trzeciej kolumnie. Wartości K<sub>2 opt</sub> odozytano z wykresu (rys. 15), wartość L<sup>K</sup> obliczono z formuły (113), wartości w<sub>a</sub> ze wzoru (114) przyjmując, że dysza gazowa nie ulegnie zmianie. Po uwzględnieniu zawirowania (wzór (117)) wyznaczono pole A<sub>a</sub> przeTablica 17

	Optymalizacja pal	nika na gaz koksownic	zy
Palnik	65/125 typu Biprohut	Po optymalizacji dla L = 2,5 m	Po optymalizacji dla L <sub>opt</sub> ≃ 1,731 m
L m	2,5	2,5	1,731
L.	262,0	262,0	181,4
10" E2	2,546	1,04	1,18
A <sub>g</sub> m <sup>2</sup>	0,001 962	0,001 962	0,001 962
A m <sup>2</sup>	0,003 811	0,006 104	0,005 707
W <sub>R</sub> DI/S	10,9	10,9	10,9
v <sub>al</sub> m/s	25,0	15,6	16,7
Wa m/s	27,6	17,2	18,4
¥0 m/s	26,0	16,6	17,7
t °c	1223	1267	1299
4 (%to = 20%)	0	5,8%	9.3%
D <sub>O</sub> um	50	50	50
D 1000	65	65	65
D <sub>2</sub> mm	120	138	135

kroju dyssy powietrza ze wzoru (116). Po obliczeniu średniej temperatury t oceniono wskaźnik oszczędności paliwa  $\omega$  według wzoru (10), przyjmując jako stan odniesienia palnik oryginalny w komorze spalania o sprawności  $\gamma_{t0} = 20\%$ . W tablicy 17 podano również średnicę dyszy gazowej D<sub>0</sub> oraz wewnętrzną D<sub>1</sub> i zewnętrzną D<sub>2</sub> średnice dyszy powietrza. Uzyskane wyniki wskazują, że modernizacja palnika 65/125 typu Biprohut lub też zastąpienie ge newym, optymalnym palnikiem powinna wywołać zmniejszenie zużycia paliwa o ok. 6% lub 9% jeżeli równocześnie ulegnie zmiznie długość komory spalania. Varto tutaj zwrócić uwagę, że ze względu na pewną swobodę w określaniu prędkości w i w (przy zachowaniu w<sub>0</sub>) jest prawdopodobnie możliwe w tym przypadku zachowanie części palnika tworzącej zewnętrzną ścianę dyszy powietrza (D<sub>2</sub> = idem) poprzez odpowiedni dobór średnic D<sub>0</sub> i D<sub>1</sub>. Modernizacja polegałaby więc na wymianie dyszy gazowej.

Podobną analisę wykonano dla palnika 125/125 typu Biprohut [11] zasilanego strumieniem  $\hat{V} = 193 \text{ m}^3/\text{h}$  gasu miessanego (koksowniczy + wielkopiecowy) o wartości opażowej  $W_d = 8$  429 kJ/kg, n = 2,014, temperaturze t = 25°C oraz podgrzanym powietrzem ( $\lambda = 1,1$ ) o temperaturze t = 400°C (dzięki czemu temperaturz kalorymetryczna t<sub>k</sub> = 2052°C), zaimstalowanego w komorze o długości L = 2,5 m, o średniej temperaturze ścian i wsadu  $t_w = 850^{\circ}$ C. Powietrze jest zawirowane ( $\beta = 25^{\circ}$ ). Wielkości pomocnicze mają wartości:  $m_g = 0,051 \ 0.84 \ \text{kg/s}, m_g = 0,138 \ 843 \ \text{kg/s}, t_r = 271^{\circ}$ C,  $P_0 = 0,591 \ \text{kg/m}^3, i_0 = 2509 \ 625 \ \text{J/kg}.$ 

W tablicy 18 zestawiono wyniki obliczeń dla palnika 125/125 oraz palników po optymalizacji podobnie jak to uczyniono w poprzednim przykładzie.

Tab	lica	18
-----	------	----

Optymalizacja	pal	nika	na	gaz	miesz	any
(koksownie	zy ·	+ wi	elka	pied	OWY)	

Palnik	125/125 typu Biprohut	Po optymalizacji dla L = 2,5 m	Po optymalizacji dla L <sub>opt</sub> = 2,342 m
Lm	2,5	2,5	2,342
L <sup>#</sup>	155,5	155,5	145,7
10 <sup>4</sup> K <sub>2</sub>	6,20	1,58	1,64
A m <sup>2</sup>	0,007 854	0,007 854	0,007 854
A m <sup>2</sup>	0,005 745	0,011 949	0,011 706
v m/s	6,8	6,8	6,8
E m/s	46,6	22,4	22,9
81 V m/s	51,4	24,7	25,2
No E/S	39,4	19,9	20,3
t °c	1355	1457	1460
$\omega(2_{+0} = 20\%)$	0	8,3%	8,5%
Do mm	100	100	100
D, mm	115	115	115
D	150	179	178

Tutaj optymalizacja palnika może przyczynić się do zaoszczędzenia ok. 8% paliwa.

Oprócz określenia cech konstrukcyjnych optymalnego, dla danych warunków, palnika przedstawione wcześniej rozważania umożliwiają wyznaczenie optymalnej długości  $L_{opt}$  przestrzeni koniecznej dla rozwinięcia się płomienia. Wielkość ta może być użyteczna przy projektowaniu komór spalania. W przypadku  $L \leq L_{opt}$  spalanie paliwa może nie zakończyć się w przestrzeni do tego celu przewidzianej, przez co może np. pojawić się chemiczna strata wyletowa. Przypadek zać  $L > L_{opt}$  wskazuje, że moc danego palnika jest za mała dla uzyskania określonego poziomu temperatury w danej komorze spalania.

Na rys. 16 przedstawiono zależność długości L<sub>opt</sub> od strumienia V gazu koksowniczego. Do sporządzenia wykresu przyjęto następujące dane:  $n_{a \min} = 4,055, t = 25^{\circ}C, \rho = 0,54 \text{ kg/m}^3, \lambda = 1,1, t = 25^{\circ}C, \rho_{a} = 1,17$ kg/m<sup>3</sup>,  $W_{d} = 28 431 \text{ kJ/kg}, t_{k} = 2064^{\circ}C, t_{w} = 850^{\circ}C, t_{r} = 25^{\circ}C, t_{0} = 25^{\circ}C,$ z których wynikają wartości wielkości pomocniczych  $\rho_0 = 1,055 \text{ kg/m}^3, i_0 =$ = 2 666 kJ/kg,  $\Theta_{\rm w} = \Theta_{\rm r} = 0,405$ . Dla ostatniej wartości z formuły (113) wynika L<sup>#</sup> = 181,383, która to wartość podstawiona do wyrażenia (106) pozwala wyznaczyć zależność długości L<sub>opt</sub> od strumienia V gazu.Wyni-ki oceny długości L<sub>opt</sub>, przedstawione na rysunku 16, w porównaniu ze spotykanymi w praktyce wymiarami przestrzeni pieców grzewczych, przewidywanymi dla pomieszczenia płomienia, wykazują dość dobrą zgodność.





800 m<sup>3</sup>/h V Rys. 16. Optymalna džugość paleniska w funkoji strumienia objętości gazu koksowniczego

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W pracy została przedstawiona oryginalna metoda teoretyczno-doświadczalna uogólnionego opisu profilu temperatury w osi dyfuzyjnych płomieni gazowych. Metoda ta polega na doświadczalnym określeniu charakterystycznych parametrów A. C. E wyodrebnionych z wyprowadzonego teoretycznie równania profilu temperatury w osi płomieni. Uogólnienie uzyskano poprzez opracowanie zależności parametrów charakterystycznych od warunków brzegowych, ujętych ostatecznie za pomocą liczby podobieństwa K., w jakich płomień jest realizowany. Oceniono dokładność uzyskiwanych wyników oraz porównano je z dość skrajnymi danymi pomiarowymi. Opracowany uogólniony opis temperatury może służyć do ilościowej oceny wpływu parametrów substratów na przebieg procesu spalania, czego liczne przykłady zamieszczone w pracy. Przede wszystkim jednak powinien on zostać wykorzystany do optymalizacji istniejących i racjonalnego projektowania nowych palników gazowych. Podstawy optymalizacji i projektowania palników zostały sprecyzowane w pracy.

Do oryginalnych osiągnieć pracy należy zaliczyć w szczególności:

- powiązanie wskąźnika oszczedności paliwa ze średnią temperaturą płomienia, umożliwiające wymierną ocene efektu zmian parametrów substratów hub cech konstrukcyjnych palnika,
- wyprowadzenie równania profilu temperatury płomienia w funkcji odległości od wylotu palnika.
- zdefiniowanie charakterystycznych parametrów profilu temperatury płomienia.
- doświadczalne określenie wartości parametrów profilu temperatury płomienia.
- opracowanie ogólnej formuły zależności parametrów charakterystycznych od warunków brzegowych, opisanych za pomocą oryginalnej liczby podobieństwa Kar
- opracowanie algorytmu optymalizacji gazowych palników dyfuzyjnych, który może być podstawą projektowania palników,
- opracowanie algorytmów obliczeń parametrów charakterystycznych na podstawie zmierzonych profili temperatur w płomieniach oraz poszukiwania formuly uogólnionej,
- wykonanie badań eksperymentalnych licznej grupy płomieni,
- realizacja obliczeń numerycznych i analiza wyników,
- ukazanie możliwości wykorzystania opracowanego opisu płomienia do analizy procesu spalania gazów.

Vyprowadzone w pracy równamie profilu temperatury w płomieniu, parametry charakterystyczne i metoda ucgólnienia mogą być wykorzystane do opracowania wyników badań innych płomieni gazowych, płomieni olejowych i py-Lowych.

Ogólna ocena metody opisu plomieni, uzyskanego uogólnienia, metody optymalizacji palników wskazuje na ich dużą przydatność praktyczną do analizy działania istniejących i projektowania nowych palników. Wyniki obliczeń wykonanych presdstawioną w pracy metodą cechuje duża wiarygodność, co wykazano w lioznych przykladach.

Opracowany model plomienia wzbogacił i powinien ożywić dziedzinę płomieni dyfuzyjnych. W pracy przedstawiono naukowo-poznawcze możliwości wykorzystania modelu do numerycznego przewidywania wpływu warunków brzegowych na przebieg zjawisk w procesie spalania. Równocześnie praca stymuluje w określonym kierunku rozwój dziedziny dyfuzyjnych płomieni gazowych, wskazując na możliwości analogicznego opisu i badania profili prędkości i koncentracji skladników ohemicznych, charakterystycznych dla zjawiska transportu pedu i substancji.

Praca może również ukierunkować daleze badania w dziedzinie płomieni olejowych, plejowo-pyłowych i pyłowych.

- House of the state of the sta states of tables of the sector were builded of the second state of the second state of the second secon

and and the second of the states where a second of the sec -civily successful and so the property provided and an and the second se a construction whether an an or other to an or a state of the second state of the seco

supervision of the profile imperatory plantamin a fundant of any

- whet followers's charactery adjustments microsofted a profit in the factor burger plan-
- manufactured billings Chapterson balancing aparticipate betapplated

and extended through the prime of the prime are prime in the prime of Boy, 15. Dergention stands patentains of Derivate and State of State and white body performing providences in a contraction

the set dependent and the set in a set of the statement of the set electrony of the second of the second of the second 
, toplacty rooms to constitute of the state 
- whileys maximum is developed association of sections -
- and on the balance of the superior state of the second state of the st ,where algolings provide and

# 7. LITERATURA and any fair to differentiate pressive by the property of the location of the

the last of the local data and the part of a last of the last of t

them, which is compared and it is not a supervised and the distance of the

Compatible in the state of the

- and the statistic is related as a first of the [1] ANNUSZEDN J.M., SOSUNOW V.A.: Dlina turbulentnogo gazowogo plameni w niepodwiżnom wozduchie razlioznoj tiempieratury. Fizika Goranja i Warywa, nr 4, 1971.
- [2] BECHER U.: Gasbaheitste Industrieöfen und Värmeanlagen. VEB, Leipsig 1968.

BEEDGEN 0.: Öl-und Gasfeuerungstechnik. Werner-Verlag, Düsseldorf 1978. [3]

- BRZUSTOWSKI T.A.: Turbulent Diffusion Flame-Model II. The Effects of [4] Buoyancy. Archivum Procesów Spalania, vol. 4, nr 4, 1973.
- CHIGIER N.A.: Application of Nodel Results to Desing of Industrial [5] Flames, Journal of the Institute of Fuel, nr 388, 1973.
- [6] CHOMIAK J.: Podstawowe problemy spalania. PWN, Warssawa 1977.
- CHUNG P.M.: Diffusion Flame in Homologous Turbulent Shear Flows. The [7] Physics of Fluids, vol. 15, nr 10, 1972.
- EBRAHT J.: Turbulente Diffusionsflammen. Gas Värme International, 8 nr 3, 19/1.
- [9] ECKELMANN G.: Die Beeinflussung der Flammenform bei Erdgas-Brennern für Drehöfen. Zement-Kalk-Gips, nr 11, 1972.
- [10] FRISTROM R.M., VESTENBERG A.A.: Strukture planieni.Mietallurgia, Nozkwa 1969.
- [11] Gasowe palniki wirowe typu BIPROHUT. Kataleg BP BIPROHUT, Gliwice 1970.
- [12] Gasowe palniki Hutmaesprojektu. Katalog Hutmassprojekt, Gliwice 1977.
- GAYDON A.G., WOLFHARD H.G.: Flames. Their structure, radiation and [13] temperature. Chapman and Hall Ltd, London 1970.
- [14] GOSMAN A.D., PUN W.M., RUNCHAL A.K., SPALDING D.B., WOLFSHTEIN M.:
- Heat and mass transfer in recirculating flows. Academic Press, Londen 1969.
- [15] GÜNTHER R.: Der Verbrennungsverlauf in turbulenten Gasflammen. Gasvärme, nr 1, 1965.
- [16] GÜNTHER R.: Measurements of flame turbulence: aims, methods and results. Journal of the Institute of Fuel, nr 353, 1950.
- GÜNTHER R., LATSCH R.: Mathematisches Modell einer turbulenten Diffisionsflaumen in einem sylindrischen Brennraum, Chemie - Ingeniems [17] - Technik, Heft 5, 1973.
- [18] HEILIGENSTARDT V.: Obligenia ciepine pieców przemysłowych. PWT, Katowice 1952.
- [19] ISSERLIN A.S. + Modelirowanije processow gerenja gaza i ustojoziwost turbulantnych planien. Archiwum Procesów Spalenia, vol. 4, nr 3,1973.
- [20] JERSZIN S.A., BOJOZAK W.P.: Issledowanije serodinamiki turbulantnogo fakiela, rozwiwajuszozegosja w koaksialnoj sputnoj struje koniecznogo rammiera, Problemy tieploenergietiki i prikladnoj tieplofisiki. Nauka, Alma-Ata 1967.
- [21] JOHNSTOWE R.E., THRING M.Wat Instaloje doświadczalne, modele i metedy powiekssania skali, PWT, Varssawa 1960.

- [22] KLEINE R., GUNTHER R.: Turbulenzerscheinungen in Diffusionsflammen. VDI Zeitschriften, Rheie 6, nr 32, 1971.
- [23] LATSCH R.: Mathematisches Modell des Strömungsverlaufs und der Wärmeabgabe einer eingeschlossenen turbulenten Diffusionsflamme. Gas Wärme International, nr 3, 1971.
- [24] LEWIS B., ELBE G.: Gorenje, planja i wzrywy w gazach.Mir,Moskwa 1968.
- [25] LUTZHÖFT W., BAUMGÄRTEL G., FETTING F.: Der Einfluss des Dralles auf Stabilität von Flammen an Flammen-haltern. BWK, nr 8, 1967.
- [26] MICHALSKI L., ECKERSDORF K.: Pomiary temperatury. WNT, Warszawa 1969.
- [27] OCHEDUSZKO S.: Termodynamika stosowana. WNT, Warszawa 1964.
- [28] PETELA R.: Paliwa i ich spalanie, cz. I:IV. Skrypt Politechniki Śląskiej, Gliwice 1978-1980.
- [29] PETELA R., WILK K.: Badania gazowych palników wirowych typu Biprohut. Gospodarka Paliwami i Energia, nr 8-9, 1973.
- [30] PETELA R., WILK K., STRZESZEWSKI R.: Badanie palnika wirowego 20/40 z typu Biprohut. Gospodarka Paliwami i Energia, nr 2, 1975.
- [31] PETELA R., WILK K.: Egzergia plomienia. Gospodarka Paliwami i Energia, nr 3, 1975.
- [32] PETELA R., WILK K.: Similarity Problems of Turbulent Diffusion Flames. Archiwum Termodynamiki i Spalania, nr 2, 1975.
- [33] PETELA R., WILK K., ZAJDEL A.: New coefficients for flame quality estimation. Archiwum Termodynamiki i Spalania, nr 1, 1978.
- [34] PETELA R., WILK K.: Podobieństwo płomieni. Hutnik, nr 7, 1978.
- [35] PETELA R., WILK K.: Opracowanie wyników doświadczalnych badań płomieni za pomocą liczb podobieństwa. Wysokoefektywne metody i środki użytkowania gazu jako paliwa, Materiały Konferencyjne, Kraków 1979.
- [36] PETELA R., WILK K.: Selection of the similarity criterions for a generalization of the flame measurement data. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Energetyka z. 71, Gliwice 1979.
- [37] POMERANCEW W.W. i inni.: Osnowy prakticzeskoj teorii gorenja. Energia, Loningrad 1974.
- [38] Poradnik matematyczny: Sprawocznik po wysszej matematike
- M.J. Wygodskiego, Nauka, Moskwa 1976. pod red. 39
- Praca naukowo-badawcza pt.: Eksperymentalne określenie kierunków zmian konstrukcyjnych palników gazowych zmierzające do zmniejszenia jednostkowego zużycia paliwa w piecach grzewczych. Wykonana pod kierunkiem prof. dr hab. inż. R. Peteli w Hucie Batory w Chorzowie, Gliwice 1975.
- [40] Praca naukowo-badawcza pt.: Badanie procesu spalania w piecach gazowych, opracowanie kierunków modernizacji palników. Wykonana pod kierunkiem prof. dr hab. inż. R. Peteli w ZM Łabędy, Gliwice 1976.
- [41] Praca naukowo-badawcza pt.: Prace badawcze i pomiarowo-regulacyjne palników pieców walcowni bruzdowych i walcowni blachy grubej. Wykonana pod kierunkiem prof. dr hab. inż. R. Peteli w Hucie Pokój w Rudzie Śl., Gliwice 1977.
- [42] Praca naukowo-badawcza pt.: Badanie mechanizmów w płomieniach przemyslowych generujących halas. Wykonana w ITC Politechniki Śląskiej Pod kierunkiem prof. dr hab. inż. R. Peteli w ramach problemu MNSzWiT I-6, Gliwice 1976-1980.
- [43] RAWE R.: Anwendung on Flammenstabilitätskriterien bei der Entwicklung von Brennern mit Gebläse für mehrere Brenngase. Gas Wärme International, nr 12, 1975.
- [44] SEIFERT H.: Turbulenter Austausch in Konzentrischen Luftstrahlen und Erdgas-Diffusionsflammen. Dissertation, Karlsruhe 1979.

- [45] SENKARA T.: Obliczenia cieplne pieców grzewczych w hutnictwie.Śląsk, Katowice 1981.
- SMRČEK J.: Empirisches Verfahren zur Beschreibung eingeschlossener turbulenter Vormisch-flammen. Gas Wärme International, nr 5, 1975. 46
- SOROKA B.S.: K razczetu turbulantnogo diffuzjonnogo fakiela w topocznoj kamere. Gazowaja Promyszlennost, nr 2, 1973. 47
- SOROKA B.S., JERINOW A.E., KOCZERGIN N.A.: Eksperimentalnoje issledowanje diffuzjonnogo turbulentnogo fakiela w topooznoj kamere. Ga-48 zowaja Promyszlennost, nr 5, 1973.
- [49] STRZAŁKOWSKI A., ŚLIŻYŃSKI A.: Matematyczne metody opracowywania wy-ników pomiarów. PWN, Warszawa 1973.
- [50] SZARGUT J.: Energetyka cieplna w hutnictwie. Śląsk, Katowice 1971.
- [51] SZARGUT J., KOLENDA Z., MAJZA E.: Zastosowanie rachunku wyrównawczego do wyznaczania współczynników równań empirycznych. Pomiary, Automatyka, Kontrola, nr 3, 1983.
- [52] TALANTOW A.W.: O mechanizmie gorenja w turbulentnom potokie odnorodnoj smiesi. Wyssz. Uczeb. Zawied., Seria Awiaojonnaja Technika, nr 3, 1963.
- [53] TOMECZEK J.: Spalanie i płomienie gazowe. Skrypt Politeohniki \$1askiej, Gliwice 1979.
- [54] TRAUSTEL S., JESCHAR R., PETERSEN V.: Über ein extrem einfaches mathematisches Modell einer Flamme in Feuerraum. VDI Berichte, Heft 246, Karlsruhe, 1975.
- VULIS L.A., JARIN L.P.: K razczotu gorenja niepieremieszannych gazow pri konecznoj skorosti reakcji. Fizika Gorenja i Wzrywa, nr 4,1971. 55
- [56] WILK K.: Badania nad wpływem niektórych parametrów substratów i cech geometrycznych palników wirowych typu Biprohut na zużycie paliwa w hutniczych piecach grzewczych. Postęp Techniczny w Energetyce Hutniczej - materiały konferencyjne, Kraków 1977.
- [57] WILK K .: The influence of swirling on the gas flame quality. V-th In-
- ternational Symposium on Combustion Processes, Kraków 1977.

1980.

- [58] WILK K.: Prędkość wypływu substratów z palnika a jakość płomienia gazowego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Energetyka, z.68,Gliwice 1978.
- [59] WILK K .: Optymalizacja działania palników gazowych. Wysokosfektywne metody i środki użytkowania gazu jako paliwa, Materiały Konferencyj-
- ne, Kraków 1979. [60] WILK K.: Oszczędności wynikające z optymalizacji palników gazowych. Problemy Energetyki Hutniczej, Materiały Konferencyjne, Częstochowa
- [61] WILK K.: The practical method of determining the industrial flame temperature profiles based on the experimental results expressed by similarity numbers. VII-th International Symposium on Combustion Processes, Jablonna 1981.
- [62] KORDAS M.: Badanie wpływu prędkości wypływu paliwa gazowego z palników wirowych typu Biprohut na wydajność pieca tunelowego. ITC Politechniki Śląskiej, praca mgr dyplomowa pod kierunkiem K. WILKA, Gliwice 1974.
- [63] LYDZBIŃSKI T., ZORYCHTA H.: Badania wpływu cech konstrukcyjnych palnika gazowego na charakterystyki płomieni. ITC Politechniki Śląskiej, praca dyplomowa pod kierunkiem K. WILKA, Gliwice 1974.
- [64] FORNALCZYK C., SOLTYSIK L.: Wpływ zmian składu chemicznego paliwa gazowego na dziażanie palników wirowych. ITC Politechniki Sląskiej, praca dyplomowa pod kierunkiem K. WILKA, Gliwice 1975.

[65] ACHTERI Z.: Budown i uruchomienie stanowiska laboratoryjnego do badania płomieni gazowych. ITC Politechniki Śląskiej, praca dyplomowa pod kierunkiem K. WILKA, Gliwice 1977.

- 86 -

- [66] JABLOŃSKI P., KUNINIEC Z.: Układ do automatycznego pomiaru temperatury w doświadczalnej komorze spalania. ITC Politechniki Śląskiej, praon dyplomown pod kierunkiem K. VILKA, Gliwice 1975.
- [67] RAJCA A., STRYGNER A.: Badanie procesu spalania mieszanki gazu koksowniozego z gazem vielkopiecowym. ITC Politechniki Śląskiej,mgr praon dyplomowa pod kierunkiem K. VILKA, Gliwice 1977. 68
- MRÓZ Z., WARTAK J.: Wpływ prędkości wypływu gasu i powietrza z palnika na pole temperatury w płomieniu. ITC Politeohniki Śląskiej, mgr praca dyplomowa pod kierunkiem K. WILKA, Gliwice 1978.
- [69] KEMPA K., NOCOŃ J.: Wpływ prędkości wypływu gazu i kąta sawirowania powietrza na pole temperatury w plomieniu. ITC Politechniki Śląskiej, prace dyplomowa pod kierunkiem K. WILKA, Gliwice 1978.
- [70] BENSKI J., BIALAS E.: Badania plomieni gasowych i olejowych. ITC Politechniki Śląskiej, praca dyplomowa pod kierunkiem K. WILKA, Gliwi-

the public of the second of th

the second 
and included on or it should be an in a set of the second 
The second 
stanting print, do task, had, h. Panant, a had the press of the second fill 

(and income the second to a balance with the strength the strength the second to a second with \$10 kines in Addaministics of the partners which they were that the last reaction is

and descent of the second of a second s

and the second 
[71] VÓJCICKI S.: Spalanie. WNT, Varszawa 1969. 

#### BADANIA DYFUZYJNYCH PALNIKÓW GAZOWYCH

#### Stressesenie

W pracy predstawiono teoretyczno-doświadozalny model dyfuzyjnych płomieni gazowych, uzyskiwanych przy umiarkowanych (od kilku do kilkudziesięciu m/s) predkościach wypływu substratów z palnika. V równaniu profilu temperatury, wyprowadzonym z bilansu energii elementu płomienia, wyodrębniono trzy charakterystyczne, bezwymiarowe parametry A, C, E. Parametr A oharakteryzuje średnią szybkość wyzwalania energii ohemicznej paliwa w płomieniu. Parametr C zawierz informację o średniej pojemności cieplnej gazów płomieniowych. Parametr E charakteryzuje promieniowanie płomienia. Wartości parametrów A. C. E określono poprzez numeryczne dopasowanie wyprowadzenego równania do profilu temperatury zmierzonego w 78 różnych płomieniach. Varunki brzegowe, przy których zrealizowano badane płomienie.opisano za pomocą liosby kryterialnej podobieństwa K., która wyraża stosunsk energii kinetycznej do pełnej (chemicznej i fizycznej) entalpii substratów, Nastepnie, metodą rachunku wyrównawczego, określono ogólne formu-Ly opisujące zależność parametrów A, C, E od liczby  $K_{2}$ . Oceniono też dokładność opracowanego modelu płomienia oraz porównano wyniki uzyskane za pomoca modelu z dość skrajnymi danymi pomiarowymi.

W pracy ukasano naukowo-posnawoze możliwości wykorzystania modelu do numeryoznego badania wpływu warunków brzegowych na profil temperatury w plomieniu i na efektywność plomienia jako źródła ciepła.

Za pomocą presentowanego modelu dyfusyjnych płomieni gazowych określono optymalne wartości predkości wypływu gazu i Dowietrza z palnika przy danych wartościach pozostałych warunków brzegowych, Optymalizacja predkości wypływu substratów z palnika posłużyła do opracowania metody numerycznej analizy działania istniejących i racjonalnego projektowania nowych dyfusyjnych palników gazowych, stosowanych powszechnie w hutniczych piecach grzewozych. Metodę zilustrowano przykładami.

# ИССЛЕДОВАНИЯ ДИФРУЗИОННЫХ ГАЗОВЫХ ГОРЕЛОК

ry a manufactured with interpret equilibrius, 270, Pell Provinsital Minutela States

Резрие

В работе представлена теоретическо-экспериментальная модель диффузасиных газовых пламеней, полученных при умеренных скоростях вытекания субстратов из горелки. Уравнение температурного профиля, выведено из энергетического баданса здемента пламени, содержит три карактерные безразмерные параметра А. С. Е. Параметр А характеризует средною быстроту освобожления химаческой энергия топлива в пламени. Параметр С содержит информацию о средней теплоёмкости газов в пламени. Параметр Е характеризует радиацию пламене. Значения параметров А, С, Е определено путьем численного приспособдения выведенного уравнения к измеренным температурным профилям для 78 различных пламеней. Краевые условя, при которых были осуществлены исследованные пламена, характернзует критернальное число подобия Ко выражающие соотноление кинетической энергин к полкой химической и физической затальшии субстратов. Общие формулы зависимостьей параметров А, С, Е от числа К, опреледено методом согласовывания результатов измерений. Сделана оденка точноста разработанной модели. Сравнение вычисленных температурных профилей с результатами экспериментальных исследований потвердло полезность разработан-HON MOJEJH.

Б работе показана научно-познавательная возможность использования модели к численному исследованию влияния краевых условий на температурный профиль пламеня и на эффективность пламеня как источника теплоти.

При исследовании представленной модели диффузионных газовых пламен определены оптимальные значения скорости вытекания газа и ноздуха из горелки при заданных значениях остальных краевых условий. Результаты оптимизации скорости вытекания субстратов из горелки применены для получения метода численного анализа действия существующих горелок а также для рационального проектирования новых диффузионных газовых горелок применяемых в металлургических печах. В работе приведены расчётные примеры численного анализа горелок.

#### THE INVESTIGATIONS OF THE DIFFUSION GAS BURNERS

#### Summary

The paper discusses the model of the diffusion gas flames, which are obtained by the moderate (from several to several tens m/s) substrates outflow velocities from the burner. The model is based on some theoretical and experimental investigation. In the flame temperature profile equation, which was derivated from the energy balance of the flame element, are isolated the three characteristic dimensionless parameters A. C. E. The parameter A characterizes the mean rate of the fuel chemical energy release in the flame. The parameter C contains the information about the mean heat capacity of the flame gases. The parameter E characterizes the flame radiation. The values of A, C, E have been determined by the numerical fitting of the derivated equation to the flame temperature profiles, which were measured in the 78 different flames. The boundary conditions, at which the examined flames were realized, are described by the similarity criterion number  $K_0$ , which expresses the ratio of kinetic energy to the full (chemical and physical component) substrates enthalpy. The general formulas describing the dependence betwen the A, C, E parameters and the number K, have been determined with use of the method of compensation calculus. The accuracy of the worked out flame model has been estimated and the results obtained from the model were compared with the literature data selected for the extreme cases.

The paper shows the scientificly - cognitive possibolities of the model for utilization of the numerical examinations of the influence of the boundary conditions on the flame temperature profile and on the efficiency of flame as the heat source.

By means of the presented model of diffusion gas flames, the optimum values of gas and air outflow velocities from burner have been determined for the given values of the another boundary conditions which are assumed to be constant. The substrates outflow velocities optimization is utilized to working out a method of the numerical analysis of the existing burners performance and to the reasonable designing of the new diffusion gas burners, which are commonly used in the heat furnaces. The method was illustrated with some examples.

Cena 21 55, -

P. 3350 84 85

#### WYDAWNICTWA NAUKOWE I DYDAKTYCZNE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ MOŻNA NABYĆ W NASTĘPUJĄCYCH PLACÓWKACH:

44-100	Gliwice — Księgarnia nr 096, ul. Konstytucji 14 b
44-100	Gliwice — Spółdzielnia Studencka, ul. Wrocławska 4 a
40-950	Katowice — Księgarnia nr 015, ul. Żwirki i Wigury 33
40-096	Kətowice — Księgarnia nr 005, ul. 3 Maja 12
<b>41-9</b> 00	Bytom — Księgarnia nr 048, Pl. Kościuszki 10
41-500	Chorzów — Księgarnia nr 063, ul. Wolności 22
41-300	Dąbrowa Górnicza — Księgarnia nr 081, ul. ZBoWiD-u 2
47-400	Racibórz — Księgarnia nr 148, ul. Odrzańska 1
44-200	Rybnik — Księgarnia nr 162, Rynek 1
41-200	Sosnowiec — Księgarnia nr 181, ul. Zwycięstwa 7
41-800	Zabrze — Księgarnia nr 230, ul. Wolności 288
00-901	Warszawa — Ośrodek Rozpowszechniania Wydawnietw Naukowych PAN — Pałac Kultury i Nauki

Wszystkie wydawnictwa naukowe i dydaktyczne zamawiać można poprzez Składnicę Księgarską w Warszawie, ul. Mazowiecka 9.