ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Antoni ZAJDEL

BADANIA WŁASNOŚCI ORAZ PARAMETRÓW PŁOMIENIA PODCZAS SPALANIA LEKKIEGO OLEJU OPAŁOWEGO

# P. 3350 101

# ENERGETYKA z. 134



**GLIWICE 2001** 

POLITECHNIKA ŚLĄSKA ZESZYTY NAUKOWE Nr 1521

Antoni ZAJDEL

Gliwice

P. 33

BADANIA WŁASNOŚCI ORAZ PARAMETRÓW PŁOMIENIA PODCZAS SPALANIA LEKKIEGO OLEJU OPAŁOWEGO

#### **OPINIODAWCY**

Prof. dr hab. inż. Stanisław Słupek Prof. dr hab. inż. Stefan Postrzednik

#### **KOLEGIUM REDAKCYJNE**

\_

REDAKTOR DZIAŁU

SEKRETARZ REDAKCJI

REDAKTOR NACZELNY - Prof. dr hab. Zygmunt Kleszczewski Dr hab. inż. Andrzej Witkowski -Prof. Politechniki Śląskiej Mgr Elżbieta Lesko

> REDAKCJA Mgr Anna Błażkiewicz

**REDAKCJA TECHNICZNA** Alicja Nowacka

> Wydano za zgodą Rektora Politechniki Śląskiej

> > PL ISSN 0372-9796

Wydawnictwo Politechniki Śląskiej ul. Akademicka 5 44-100 Gliwice tel./fax (0-32) 237-13-81 Dział Sprzedaży i Reklamy (0-32) 237-18-48

> www.wydawnictwo.polsl.gliwice.pl wydawnictwo@polsl.gliwice.pl

Nakl. 100 + 50 egz. Ark. wyd. 10 Ark. druk. 6,75 Papier offset. kl. III 70 x 100, 80 g. Oddano do druku 11.12.2001 r. Podpis. do druku 11.12.2001 r. Druk ukończ. w grudniu 2001 r.

Fotokopie, druk i oprawę wykonał "ROLEK", Gliwice, ul. Kazimierza Wielkiego 4

ALEI

		,			

SPIS TRESCI

		Str.
PR	ZEDMOWA	7
W	YKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	9
1.	SPALANIE PALIW CIEKŁYCH	11
	1.1. Wprowadzenie	11
	1.2. Przegląd literatury przedmiotu	11
	1.3. Aspekty energetyczne i ekologiczne	14
2.	SPECYFIKA SPALANIA PALIW CIEKŁYCH ZA POMOCĄ PALNIKÓW	15
	2.1. Eksploatacja palników olejowych	15
	2.2. Płomienie olejowe	17
	2.3. Cel i zakres pracy	18
3.	WYBRANE BADANIA WSTĘPNE	20
	3.1. Spalanie oleju przy użyciu rozpylacza ciśnieniowego	20
	3.1.1. Opis stanowiska i zakresu pomiarów	20
	3.1.2. Przebieg badań i wyniki pomiarów	22
	3.1.3. Analiza wyników	26
	3.2. Spalanie oleju przy użyciu rozpylacza dwuczynnikowego	29
	3.2.1. Opis zakresu badań	29
	3.2.2. Przebieg badań i wyniki pomiarów	30
	3.2.3. Analiza wyników	36
4.	EKSPERYMENTALNE BADANIA WŁASNOŚCI PŁOMIENI OLEJOWYCH	40
	4.1. Stanowisko badawcze i zakres badań	40
	4.2. Sposób przeprowadzania pomiarów	44
	4.2.1. Pomiar temperatury	44
	4.2.2. Pomiar koncentracji sadzy	46

	1	str.
	4.2.3. Pomiar opromieniowania ścian komory spalania	48
	4.2.4. Wyznaczanie rozmiarów płomienia	48
	4.2.5. Pomiar średnic kropel	49
	4.3. Wyniki pomiarów	50
	4.3.1. Wyniki szczegółowe wybranej serii płomieni	50
	4.3.2. Wyniki uśrednione zmierzonych parametrów	54
	4.4. Błędy pomiarowe	55
	4.4.1. Parametry substratów spalania	55
	4.4.2. Parametry w komorze spalania	60
	4.5. Analiza wyników pomiarów	60
	4.5.1. Wpływ stosunku nadmiaru powietrza	61
	4.5.2. Wpływ parametrów rozpylania	64
	4.5.3. Wpływ stanu cieplnego komory	68
5.	RADIACYJNA WYMIANA CIEPŁA W KOMORZE SPALANIA	72
	5.1. Opis układu i modelu obliczeniowego	72
	5.2. Wyniki obliczeń i analiza	75
	5.2.1. Wyniki obliczeń	75
	5.2.2. Błąd wyznaczenia emisyjności płomienia	75
	5.2.3. Analiza wyników	77
	5.2.3.1. Rola płomienia i spalin w radiacyjnej wymianie ciepła	77
	5.2.3.2. Wpływ parametrów spalania i rozpylania	78
	5.2.3.3. Wpływ stanu cieplnego komory spalania	83
	5.3. Ocena efektów energetycznych	85
	5.4. Emisyjność płomienia olejowego	91
6.	ZALEŻNOŚCI EMPIRYCZNE	95
	6.1. Zakres opracowanych zależności	95
	6.2. Dobór postaci zależności	98
7.	PODSUMOWANIE	101
LI	TERATURA	103
ST	RESZCZENIE	108

# CONTENTS

	Page
PREFACE	7
NOMENCLATURE	9
1. COMBUSTION OF LIQUID FUELS	11
1.1. Introduction	11
1.2. Review of bibliography	11
1.3. Energy and ecology aspects	14
2. SPECIFICITY OF COBUSTION PROCESS REALISED BY MEANS OIL	
BURNERS	15
2.1. Operation of oil burners	15
2.2. Oil flames	17
2.3. Aim and scope of the thesis	18
3. SELECTED PRELIMINARY INVESTIGATIONS	20
3.1. Oil combustion with using a pressure atomizer	20
3.1.1. Experimental set and scope of tests	20
3.1.2. Experiments and measurement results	22
3.1.3. Analysis of results	26
3.2. Oil combustion with using a twin fluid atomizer	29
3.2.1. Scope of tests	29
3.2.2. Experiments and measurement results	30
3.2.3. Analysis of results	36
4. EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF OIL FLAME PROPERTIES	40
4.1. Experimental set and scope of studies	40
4.2. Way of currying the measurements	44
4.2.1. Measurement of temperature	44
4.2.2. Measurement of soot concentration	46

	. /	page
	4.2.3. Measurement of irradiation of walls of combustion chamber	48
	4.2.4. Determining of flame sizes	48
	4.2.5. Measurement of sizes of droplets	49
	4.3. Results of measurements	50
	4.3.1. Detailed results of selected flame series	50
	4.3.2. Mean results of measured parameters	54
	4.4. Errors of measurements	55
	4.4.1. Parameters of substrates of combustion process	55
	4.4.2. Parameters inside combustion chamber	60
	4.5. Analysis of results of measurements	60
	4.5.1. Influence of air excess ratio	61
	4.5.2. Influence of parameters of atomization process	64
	4.5.3. Influence of thermal state of chamber	68
	RADIATIVE HEAT EXCHANGE INSIDE THE COMBUSTION CHAMBER	72
	5.1. Description of system and model for calculations	72
	5.2. Results and analysis	75
	5.2.1. Results of calculations	75
	5.2.2. Error of determining of flame emissivity	75
	5.2.3. Analysis of results	7
	5.2.3.1. Participation of flame and flue gases in radiative heat exchange	7
	5.2.3.2. Influence of combustion and atomization parameters	78
	5.2.3.3. Influence of thermal state of chamber	83
	5.3. Evaluation of energy effects	84
	5.4. Emissivity of oil flame	91
	EMPIRICAL DEPENDENCES	9
	6.1. Scope of elaborated dependences	95
	6.2. Selection of form of dependences	98
	CONCLUSIONS	10
F	FERENCES	103
Ľ		105
		100

6

S

6

#### PRZEDMOWA

Niniejsza rozprawa dotyczy spalania paliw ciekłych i zawiera analizę prawidłowości zachodzących pomiędzy różnymi parametrami spalania paliwa ciekłego w komorze spalania a energetycznymi i ekologicznymi skutkami tego procesu.

Tematyka pracy zrodziła się kilka lat temu w trakcie wykonywania prac badawczowdrożeniowych, których celem było opracowanie nowych konstrukcji palników olejowych dla potrzeb rozruchu pyłowych kotłów energetycznych OP-650 i OP-380 i stabilizacji spalania pyłu w tych kotłach. Od nowych rozwiązań oczekiwano wyeliminowania kłopotów ruchowych występujących przy użytkowaniu dotychczasowych palników i znacznego obniżenia emisji sadzy. Spostrzeżenia poczynione w trakcie tych prac, zwłaszcza odnośnie do energetycznych efektów uzyskiwanych po zainstalowaniu w kotłach OP-650 i OP-380 nowych ekologicznych palników olejowych, zainspirowały autora do bliższego zajęcia się tematyką spałania paliw ciekłych. Dodatkowym powodem był też fakt, że w fachowej literaturze dotyczącej spalania zagadnienie spałania paliw ciekłych i płomieni olejowych jest opisane mało wyczerpująco i nie dostarcza narzędzi do analizy pracy urządzeń opalanych tymi paliwami.

Badania rozpoczęto od szeregu serii eksperymentów wykonanych na kilku przygotowanych stanowiskach laboratoryjnych, które to badania wskazywały, że specyfika procesu spalania paliw ciekłych i uzyskiwanych płomieni olejowych jest na tyle odmienna od prawidłowości występujących podczas spalania paliw gazowych, że intuicyjna analiza wpływu różnych parametrów, oparta na doświadczeniach spalania paliw gazowych, może prowadzić do zupełnie niewłaściwych wniosków.

Po tych wstępnych badaniach przygotowany został program usystematyzowanych badań zasadniczych, możliwych do przeprowadzenia w warunkach laboratoryjnych, jednak w skali zbliżonej do procesów rzeczywistych, tak aby uzyskane rezultaty i stwierdzone prawidłowości były użyteczne również w skali rzeczywistej.

Badania przeprowadzono w laboratorium Zespołu Techniki Spalania Instytutu Techniki Cieplnej Politechniki Śląskiej.

Wszystkim, którzy wykazywali życzliwe zainteresowanie badaniami i stworzyli warunki do ich prowadzenia, a w szczególności Panom Profesorom Ryszardowi Peteli, Janowi Szargutowi, Ryszardowi Wilkowi i Andrzejowi Ziębikowi, serdecznie dziękuję.

# WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

ω	- wskaźnik oszczędności energii, %.
τ	- czas, s, h
ρ σ <sub>c</sub>	- stała Stefana-Boltzmanna, 5.67·10 <sup>-8</sup> W/(m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )
0	- gestość kg/m <sup>3</sup>
2	- stosunek nadmiaru powietrza
n	- sprawność.
0	- stosunek konfiguracij
5	- emisviność
A	- bład bezwzgledny
W	- wartość onałowa J/kg
V W/	- pojemność cieplna I/K
1,1	- temperatura, K, °C
<b>З</b>	- parametr wietkości komory spalania, K/(s·m)
r	- promien, m
R	- refleksyjność,
Q	- strumień ciepła, W
p	- cismenie, ra
P	- ilosc paliwa, kg
L	- grubość warstwy gazu, m
k	- stała własności optycznych sadzy,
I	- entalpia, J
h	- wysokość, m
Ĥ	- jasność promieniowania, W
g	<ul> <li>gęstość opromieniowania, W/m<sup>2</sup></li> </ul>
G	- opromieniowanie, W
F	- powierzchnia, m <sup>2</sup>
ė	- gęstość emisji własnej, W/m <sup>2</sup>
Ė	- emisja własna promieniowania, W
d	- średnica, μm, m
D	- transmisyjność,
с	- koncentracja sadzy, mg sadzy/m <sup>3</sup> spalin, m <sup>3</sup> sadzy/ m <sup>3</sup> spalin
Α	- absorpcyjność,

- ciało czarne, - płomień, - gaz, spaliny, - komora,

С f

g

k

	7
	~

n - warunki normalne,

- S Sautera (średnica kropel),
- s sadza,
- w ściana,
- cf ciało czarne o temperaturze płomienia,
- cw ciało czarne o temperaturze ścian,
- gf dotyczy spalin przy temperaturze płomienia,
- gw dotyczy spalin przy temperaturze ścian.

# 1. SPALANIE PALIW CIEKŁYCH

#### 1.1. Wprowadzenie

Paliwa ciekłe znajdują szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach przemysłu i innych sferach działalności człowieka. Obszar ich zastosowań obejmuje komory spalania kotłów energetycznych, pieców przemysłowych oraz mniejszych urządzeń komunalnych, jak również silniki spalinowe i rakietowe. Według różnych danych poprzez spalanie paliw ciekłych zaspokajane jest około 35-40% całkowitego zapotrzebowania energii na świecie [5, 78, 94].

Paliwa ciekłe obejmują substancje o znacznie zróżnicowanych własnościach fizycznych, które w istotny sposób wpływają na mechanizm spalania tych paliw. W zależności od tych własności paliwa ciekłe spalane są na dwa podstawowe sposoby: pierwszy dotyczący paliw lekkich i drugi dotyczący paliw ciężkich.

Spalanie lekkich, łatwo parujących paliw ciekłych, takich jak benzyny czy nafta, zachodzi z reguły w sposób podobny do kinetycznego spalania gazu, gdzie do komory spalania doprowadzana jest jednorodna mieszanka par paliwa i powietrza.

Mechanizm spalania ciężkich paliw ciekłych, obejmujących szeroki wachlarz paliw od olejów napędowych do ciężkich olejów smołowych, jest inny. Paliwa te wprowadzane są bezpośrednio do komory spalania w postaci strugi kropel uzyskiwanej za pomocą rozpylacza, a proces spalania jest ostatnim etapem ciągu zjawisk, na przebieg których duży wpływ ma konstrukcja palnika olejowego. Spalające się paliwo tworzy tu wyraźny, dobrze świecący płomień obejmujący obszar, w którym zachodzą zjawiska podgrzewania i odparowania kropel, powstawania mieszanki palnej, zapłonu i reakcji chemicznych.

Niniejsza praca dotyczy spalania tej drugiej grupy paliw ciekłych używanych do opalania większości stacjonarnych komór spalania.

Struktura płomienia olejowego jest bardzo niejednorodna. W różnych miejscach obszaru płomienia różna jest koncentracja i także postać fazowa paliwa. Krople o zróżnicowanej średnicy poruszają się w różnych kierunkach z prędkościami różniącymi się od prędkości głównego strumienia fazy gazowej.

Ta duża niejednorodność przestrzennej struktury oraz złożoność zachodzących zjawisk sprawiają, że spalanie rozpylonej strugi paliwa ciekłego stanowi proces trudny do teoretycznego opisu. Nie wypracowano zatem zadowalająco dokładnych modeli przebiegu tego procesu. Liczne przeprowadzone badania umożliwiły poznanie szeregu prawidłowości, które obowiązują jednakże z reguły w wąskim zakresie wykonanych badań bez możliwości formułowania szerszych uogólnień.

#### 1.2. Przegląd literatury przedmiotu

Powstało szereg kompleksowych opracowań prezentujących stan wiedzy i badań nad procesem spalania paliw ciekłych w postaci rozpylonej strugi kropel [2, 11, 12, 19, 20, 47, 71]. Autorzy tych opracowań koncentrują swoją uwagę na różnych aspektach procesu, jak na przykład na zjawisku odparowywania kropel, na warunkach spalania pojedynczych kropel w otoczeniu grupy innych kropel, na spalaniu chmury kropel, na spalaniu w przestrzeni między kroplami, na warunkach dynamiki dwufazowego medium i jeszcze na wielu innych.

Omawiane są też w nich modele spalania strugi kropel, wraz z ich licznymi ograniczeniami i założeniami upraszczającymi. Z tych obszernych analiz wynika, że zadowalająco poprawne wyniki obliczeń niektórych parametrów rozpylonej strugi uzyskiwać można jedynie dla takich przypadków spałania paliw ciekłych, w których przyjęcie homogeniczności procesu, czyli jego podobieństwo do spalania gazu w płomieniach dyfuzyjnych, jest bliskie rzeczywistości. Według takiego mechanizmu może przebiegać niekiedy spalanie jedynie lekkich paliw ciekłych. Natomiast obecność ciekłych cząstek paliwa w obszarze płomienia, co zawsze ma miejsce przy spalaniu paliw cięższych, wnosi wiele zasadniczych zmian jakościowych w stosunku do układu homogenicznego i modele procesu oparte na przepływach jednofazowych nie zapewniają poprawnego opisu parametrów takiej strugi.

Szereg podejmowanych prób opracowania dwufazowego modelu spalania rozpylonej strugi paliwa ciekłego wykazało, że jest to zadanie bardzo trudne i przy obecnym stanie rozpoznania tego procesu niemożliwe do wykonania. Jednym z ważniejszych problemów jest identyfikacja warunków brzegowych analizowanego obszaru, czyli między innymi dokładna znajomość wszystkich parametrów na wylocie z palnika olejowego. Jest to zadanie możliwe do rozwiązania jedynie na drodze eksperymentalnej, a zatem dla ściśle określonych, szczegółowych przypadków palników olejowych i ściśle określonych parametrów fizycznych rozpylanego paliwa.

Takie też przykłady modelowania można spotkać w literaturze [2, 20, 52, 66, 70, 83, 85], ale ich przydatność jest ograniczona, zwłaszcza że w równaniach energii nie jest uwzględnione promieniowanie. Tymczasem właśnie promieniowanie jest charakterystyczną i istotną, dla energetycznego oddziaływania, cechą płomienia olejowego. Wpływa ono w za-sadniczy sposób na intensywność wymiany ciepła i rozkład temperatury w komorze spalania.

Promieniowanie płomienia jest ściśle uzależnione od zawartości cząstek stałych (sadza) i ciekłych (krople paliwa) w jego obszarze. Znajomość mechanizmu powstawania sadzy w płomieniu, zwłaszcza olejowym, jest ciągle niewystarczająca i stanowi poważną przeszkodę w opracowaniu miarodajnego modelu przepływu ciepła w komorze z płomieniem olejowym.

Obliczeniami radiacyjnego przepływu ciepła zajmuje się wielu badaczy. Jest bogata literatura na ten temat. Jednakże przeprowadzenie poprawnych obliczeń radiacyjnej wymiany ciepła w komorach spalania nie jest łatwe, choć istnieje już szereg opracowanych modeli tego procesu [8, 26, 64, 65, 69, 82]. Podstawowy problem przy ich praktycznym wykorzystaniu leży w niejednorodności i często niemożności wyznaczenia parametrów radiacyjnych mediów wypełniających obszar komory spalania.

Stosunkowo skutecznie można pokonać te kłopoty dla przypadków tak zwanych płomieni nieświecących, czyli dla komór opalanych paliwami gazowymi. Problem staje się praktycznie nierozwiązy walny przy spalaniu paliw ciekłych, gdy płomień zajmujący pewną przestrzeń w komorze spalania intensywnie świeci, a koncentracja cząstek stałych i ciekłych w różnych częściach jego objętości, często występujących też poza płomieniem, nie jest znana.

Wobec takiego stanu rzeczy, gdy praktycznie brak jest użytecznych narzędzi umożliwiających obliczeniowe określenie parametrów płomieni powstających przy spalaniu różnych paliw ciekłych, podstawową w tym zakresie wiedzę uzyskuje się poprzez badania eksperymentalne.

Rezultaty tych badań, prezentowane w literaturze przedmiotu, dostarczają informacji o parametrach płomieni olejowych powstających przy spalaniu różnych paliw ciekłych, w różnych układach spalania, przy użyciu palników różnej konstrukcji. Badane są wpływy szeregu parametrów spalania na parametry uzyskiwanych płomieni.

Dla przykładu, w pracach [18, 34, 59, 67] zaprezentowano rezultaty badań wpływu różnych parametrów paliwa i warunków rozpylania na rozmiary uzyskiwanych kropel oraz ich prędkość poruszania się w strudze za rozpylaczem. Różni autorzy stosowali różnego typu rozpylacze. Przy spalaniu paliw lekkich, jak np. nafta, metanol, stosuje się z reguły rozpylacze ciśnieniowe, natomiast przy spalaniu paliw cięższych częściej stosowane są różne kon-

strukcje rozpylaczy dwuczynnikowych, dla których w nazewnictwie polskim używa się również określeń: pneumatyczne bądź gazodynamiczne [57].

Inne parametry płomieni, jak: długość płomienia, rozkłady temperatury wewnątrz płomieni, koncentracja składników spalin, rozkłady prędkości, były przedmiotem badań autorów prac [1, 13, 24, 38, 55, 56, 96]. W większości tych prac prezentowane są wyniki badań eksperymentalnych najwyżej kilku wariantów płomieni. Oceniano w nich wpływ wybranych parametrów spalania, takich jak np. nadmiar powietrza, parametry powietrza, jakość rozpylania, rodzaj paliwa, parametry paliwa itp., na parametry otrzymywanych płomieni.

W poszczególnych pracach badano płomienie otrzymywane przy zastosowaniu 2-3 różnych wartości jednego z wymienionych wyżej parametrów spalania. Na tej podstawie można ocenić tylko jakościowe wpływy analizowanych parametrów spalania oleju, natomiast ilościowy wymiar tych efektów jest miarodajny wyłącznie dla stosowanego w badaniach zakresu i warunków prowadzonych eksperymentów.

To ograniczenie ważności poczynionych obserwacji na podstawie wąskiego zakresu prowadzonych badań prowadzi niekiedy do wyciągania odmiennych wniosków przez różnych badaczy. Dla przykładu, autorzy pracy [56] stwierdzili, w oparciu o swoje badania, że spalanie rozpylonego paliwa ciekłego, niezależnie od jego rodzaju, przebiega podobnie do spalania gazu i struktura płomienia olejowego jest podobna do struktury dyfuzyjnego płomienia gazowego. Natomiast autorzy pracy [96] wyraźnie uwypuklają różnice w przebiegu obu tych procesów i wskazują na ogromny wpływ, ogólnie mówiąc, parametrów spalania na strukturę uzyskiwanego płomienia.

Podobieństwo do dyfuzyjnego płomienia gazowego można uzyskać tylko wówczas, gdy zapewnione zostaną warunki, przy których odparowanie znacznej większości paliwa wypływającego z palnika następuje na odcinku bardzo krótkim w porównaniu do całkowitej długości płomienia. Jeżeli zatem są zapewnione takie warunki, to wpływ np. rozmiarów kropel na przebieg procesu jest nieduży. Ale w praktyce takie warunki można zapewnić jedynie przy spalaniu lekkich paliw ciekłych. Przy spalaniu paliw cięższych, gdzie rozmiary kropel rozpylonego paliwa są z reguły większe, zawsze obserwuje się istotny wpływ tych rozmiarów na parametry uzyskiwanego płomienia. Takie też wnioski wynikały z badań autorów pracy [38], pomimo że badane płomienie uzyskiwano przy spalaniu nafty, która należy do bardziej lotnych paliw ciekłych.

Kolejną grupę parametrów badanych przy spalaniu paliw ciekłych stanowi koncentracja różnych szkodliwych substancji w gazach popłomieniowych. Szczególną uwagę zwraca się tu na tworzenie i emisję takich składników, jak sadza, tlenek węgla, tlenki azotu, węglowodory aromatyczne.

W szeregu prac zaprezentowano wyniki takich badań [3, 4, 14, 15, 45, 72, 74, 75, 81, 88, 90, 92]. Najczęściej zawierają one dane odnośnie do rozkładu koncentracji badanych składników w obrębie komory spalania, jak również wielkości emisji na wylocie z komory. Określano wpływ różnych parametrów spalania na powstawanie i wielkość emisji składników toksycznych. Uzyskiwane wyniki informują o występujących poziomach tych emisji i wskazują na sposoby ich zmniejszania. Sposoby te są z reguły dobrze znane specjalistom z techniki spalania, gdyż wiadomo jest, jakie okoliczności sprzyjają powstawaniu różnych substancji szkodliwych podczas spalania. Zazwyczaj zatem, na przykład, takie zmiany różnych parametrów spalania, które prowadzą do wzrostu temperatury w płomieniu, przynoszą zmniejszenie ilości powstającej sadzy oraz CO, natomiast powodują zwiększenie zawartości NO<sub>x</sub> w spalinach.

Przy spalaniu różnych paliw ciekłych, w różnych warunkach komór spalania, rola konkretnych parametrów spalania w obniżeniu emisji substancji szkodliwych nie jest jednak jednakowa, a na dodatek mogą istnieć pewne ograniczenia w swobodnej zmianie takich parametrów.

#### 1.3. Aspekty energetyczne i ekologiczne

Każdy proces spalania zachodzący w nowoczesnym urządzeniu musi spełniać wysokie wymagania zarówno energetyczne, jak i ekologiczne. Sprawność termiczna, która jest miarą doskonałości energetycznej procesu, jest także pewnym parametrem ekologicznym, gdyż jej niska wartość niesie negatywne skutki dla środowiska. Są jednak jeszcze inne parametry charakteryzujące uciążliwość procesu dla środowiska i dlatego w rzeczywistych warunkach dobór parametrów spalania musi być rezultatem pewnej optymalizacji. Godząc się na nieuniknione skutki ekologiczne w postaci dopuszczalnej emisji zanieczyszczeń, należy dążyć do maksymalnej efektywności energetycznej procesu.

Przeprowadzenie w pełni miarodajnej optymalizacji wymagałoby zastosowania wspólnego kryterium dla energetycznych i ekologicznych skutków analizowanego procesu. Takim kryterium jest koszt ekologiczny ponoszony w związku z wytwarzaniem danego produktu [77]. Jest on zdefiniowany jako skumulowane zużycie egzergii nieodnawialnych bogactw naturalnych wykorzystywanych w procesie produkcyjnym oraz w celu skompensowania strat związanych z odprowadzaniem szkodliwych substancji do otoczenia. Aby posłużyć się kosztem ekologicznym, należy jednak znać charakterystyki eksploatacyjne optymalizowanego procesu, a wiedza o tych danych jest często niepełna.

Przy spalaniu paliw ciekłych można istotnie wpływać zarówno na skutki energetyczne, jak i ekologiczne procesu poprzez odpowiedni dobór parametrów spalania. Możliwa skala tego wpływu jest tu znacznie większa aniżeli przy spalaniu innych paliw. Wynika to z dużego uzależnienia zdolności promienistych płomienia olejowego, jak również poziomu emisji substancji szkodliwych, od warunków spalania. Promieniowanie płomienia olejowego ma duży udział w promienistej wymianie ciepła w komorze spalania, a ta z kolei decyduje o efektywności procesu przekazywania energii w typowych komorach spalania.

Przy spalaniu paliw gazowych promieniowanie płomienia jest mniejsze i mniejsza jest też możliwość oddziaływania na jego wartość. Praktycznie jedynym parametrem płomienia, którego zmiany, uzyskane przez zmianę warunków spalania, mogą wpłynąć na intensywność promienistej wymiany ciepła w komorze, jest temperatura płomienia.

Inaczej jest przy spalaniu paliw ciekłych. Przez zastosowanie różnych parametrów spalania można uzyskać istotne zmiany wszystkich tych parametrów płomienia, które wpływają na jego promieniowanie. Poza temperaturą płomienia są to: emisyjność i rozmiary. Możliwe zmiany tych dwóch ostatnich parametrów płomienia, zwłaszcza uzyskiwane w efekcie zróżnicowanych parametrów rozpylania, są znacznie większe w swoim zakresie aniżeli występujące zmiany temperatury. Dzięki temu można w dość dużym stopniu wpływać na intensywność promienistej wymiany ciepła w komorze spalania. W swoich badaniach dotyczących spalania ciężkich paliw ciekłych w komorach kotłów energetycznych, które wykonywane były na zlecenie dużych polskich elektrowni, autor obserwował wyraźne efekty zróżnicowanego promieniowania płomieni olejowych [104, 105, 110].

W literaturze przedmiotu, przy prezentacji rezultatów badań różnych parametrów płomieni olejowych, zamieszczane są niekiedy również wyniki pomiarów parametrów promienistych [1, 13, 23, 25]. Nie jest jednak zauważany problem zróżnicowania tych parametrów oraz ich uzależnienia od parametrów spalania. Ze względu na poznawcze i praktyczne znaczenie tego problemu, dające szansę na uzyskanie tą drogą pewnych efektów energetycznych, autor postanowił przeprowadzić szersze badania dla określenia występujących w tym zakresie prawidłowości. Wyniki tych badań zostaną zaprezentowane w niniejszej pracy.

# 2. SPECYFIKA SPALANIA PALIW CIEKŁYCH ZA POMOCĄ PALNIKÓW

## 2.1. Eksploatacja palników olejowych

Praktyka użytkowania opałowych instalacji olejowych, zwłaszcza zasilanych ciężkim olejem opałowym, wskazuje na możliwość występowania pewnych problemów eksploatacyjnych, które pojawiają się przy niezbyt dokładnym dotrzymywaniu wymaganych parametrów technicznych pracujących urządzeń, co w warunkach ruchowych występuje jednak dość często. Autor ma w tej mierze własne doświadczenia uzyskane w trakcie realizacji wcześniej wspomnianych licznych prac badawczych dotyczących spalania ciężkiego oleju opałowego w komorach kotłów parowych polskich elektrowni [104-106, 110, 111]. Można tu wymienić trzy zagadnienia: *słabą stabilność płomienia, dużą ilość sadzy* wydzielającej się podczas spalania oraz podatność na *zatykanie otworów paliwowych* w rozpylaczu.

Słaba stabilność płomienia jest poważnym problemem eksploatacyjnym podczas spalania paliw ciekłych, a dolegliwość ta nasila się zwłaszcza wtedy, gdy spalanie zachodzi w zimnej komorze. Proces podgrzewania i odparowywania strugi kropeł tworzących żagiew płomieniową przebiega wówczas wolniej, gdyż nie jest wspomagany dopływem ciepła od gorących elementów komory. Odcinek zapłonowy wydłuża się, a czoło spalania oddala od wylotu palnika, co może doprowadzić do oderwania płomienia.

Potrzeba spalania oleju w zimnej komorze ma miejsce na przykład podczas rozruchu parowych lub wodnych kotłów opalanych pyłem węglowym. Pył węglowy można bezpiecznie doprowadzać do komory kotła i stabilnie go w niej spalać dopiero wówczas, gdy poziom temperatury w komorze jest wystarczająco wysoki. Rozgrzewanie komory odbywa się najczęściej za pomocą płomienia olejowego.

Zapewnienie dobrej stabilności płomienia olejowego jest zadaniem tym trudniejszym, im spalane paliwo ma większą gęstość, a mniejszą lotność, im większe są prędkości wypływu czynników z palnika oraz im chłodniejsze jest otoczenie płomienia.

Ciężkie paliwa mają większą lepkość, przez co trudniej jest je dokładnie rozpylić i otrzymać krople o małych rozmiarach. Dobre rozpylenie jest zaś podstawowym warunkiem zapewnienia krótkiego czasu podgrzewania i odparowywania kropel opuszczających rozpylacz, a tym samym zmniejszenia długości odcinka zapłonowego w płomieniu i poprawy stabilności.

Przy spalaniu paliw ciekłych najczęściej stosowane są dwa podstawowe typy rozpyłaczy: ciśnieniowe i dwuczynnikowe. Znacznie lepszą skuteczność rozpylania można uzyskać przy zastosowaniu rozpylaczy dwuczynnikowych, w których paliwo rozpylane jest za pomocą przepływającego, z dużą prędkością, czynnika gazowego. Najczęściej jest to lekko przegrzana para wodna lub sprężone powietrze. Te wysokie prędkości wypływu czynników z rozpylacza z jednej strony intensyfikują przebieg zjawisk przepływowych w obszarze płomienia, ale z drugiej utrudniają stabilizację płomienia.

Widać zatem, że poprawiając jeden parametr procesu można pogorszyć inny. Tymczasem obydwie te cechy: dokładność rozpylenia oraz dobra stabilność uzyskiwanego płomienia są istotne i powinny być traktowane równoważnie przez konstruktorów palników olejowych. Zapewnienie jednak dobrej stabilności płomienia w warunkach zimnej komory nie jest łatwe do osiągnięcia.

Problem stabilności spalania jest dobrze znany konstruktorom i użytkownikom palników i znane są sposoby stabilizowania płomieni [7, 62]. Jednakże praktyczne ich zastosowanie przy spalaniu ciężkich paliw ciekłych nie zawsze się udaje.

Najlepsze rezultaty daje metoda cyrkulacji aerodynamicznej, w której chodzi o wytworzenie w obszarze płomienia, w pobliżu wylotu palnika, strefy odpowiednio





- Rys. 2.1. Stabilizacja płomienia olejowego przez Rys. 2.2. Stabilizacja płomienia olejowego przez wirowanie strugi powietrza Fig. 2.1. Oil flame stabilization by swirling of an air stream
  - zapewnienie dużego kata wpływu paliwa z palnika Fig. 2.2. Oil flame stabilization by ensuring a big

angle of fuel-jet flowing out from burner

intensywnych przepływów zwrotnych w postaci wirów, które stanowią źródło stałego zapłonu dla tworzącej się mieszanki palnej. Efekt ten można uzyskać poprzez umieszczenie odpowiednich zawirowywaczy w końcowym odcinku przewodu powietrza wypływającego z palnika. Na rysunku 2.1 pokazano istotę tego sposobu. Takie rozwiązania palników sa stosowane w przemyśle, jednakże sposób ten nie zawsze jest skuteczny, gdyż różne zmiany dynamiki przepływu gazów w komorze spalania, często wynikające z potrzeb eksploatacyjnych urządzenia, mogą spowodować utratę stabilności płomienia.

Innym sposobem wytworzenia strefy wirów cyrkulacyjnych jest zapewnienie odpowiedniego kształtu płomienia, który powinien się cechować dużym kątem rozwarcia. We wnętrzu stożka płomieniowego, w pobliżu jego osi, powstaje wówczas naturalna strefa przepływów zwrotnych, która istnieje niezależnie od ilości i sposobu doprowadzenia powietrza do spalania. Istota tego sposobu pokazana jest na rysunku 2.2. Jednym z rozwiazań konstrukcyjnych palników olejowych, w którym znalazł praktyczne zastosowanie ten sposób wytwarzania strefy cyrkulacyjnej stabilizującej płomień, jest rozwiązanie znane w literaturze pod nazwą palnika z rozpylaczem typu Y [58, 94]. W palniku tym żagiew płomienia ma kształt palczasty i składa się z kilku osobnych kosmyków, których osie tworzą duży kat. Taki sam kształt płomienia można też otrzymać przy innych rozwiązaniach konstrukcyjnych palników, na przykład przedstawionym w patencie [40].

Praktyka wykazała, że stabilność takich palczastych płomieni olejowych jest lepsza niż płomieni zwartych. Jest poprawna również w warunkach zimnej komory. Palniki zapewniające taki kształt płomienia znajdują obecnie najszersze zastosowanie w nowoczesnych kotłach energetycznych.

Przy spalaniu paliw lżejszych od mazutu, jak na przykład lekkiego oleju opałowego, łatwiej jest zapewnić stabilność płomienia. Jednakże w przypadku palników z rozpylaczami gazodynamicznymi, przy których uzyskuje się typowy, zwarty kształt żagwi płomieniowej, także i przy tym paliwie może wystąpić utrata stabilności płomienia, jeżeli dobór parametrów czynników nie jest prawidłowy [101].

Drugim z wymienionych wyżej problemów eksploatacyjnych spalania paliw ciekłych jest podatność na emisję sadzy. Także i ten problem nasila się przy spalaniu w zimnej komorze.

Dwa podstawowe czynniki odgrywają tu decydującą role: dokładność rozpylania i parametry powietrza do spalania (ilość, prędkość, zawirowanie). Poprawę jakości rozpylania uzyskać można na przykład przez zastosowanie, wspomnianych wyżej, rozpylaczy

dwuczynnikowych. Przy małych rozmiarach kropel paliwa i wysokich prędkościach przepływu gazów płomieniowych, jakie zapewniają poprawnie skonstruowane palniki z rozpylaczami dwuczynnikowymi, parametry powietrza nie są już tak istotne. Dla uzyskania dobrego wypalenia paliwa w obszarze płomienia i tym samym uniknięcia unoszenia sadzy poza obszar płomienia należy wówczas jedynie zapewnić dopływ wystarczającej ilości powietrza do przestrzeni, w której zachodzi spalanie, natomiast mniej ważna jest prędkość przepływu bądź zawirowanie tego powietrza w przekroju wylotowym palnika.

Przy zastosowaniu dobrze skonstruowanych rozpylaczy ciśnieniowych uniknięcie emisji sadzy jest również możliwe, jednakże pod warunkiem ścisłego dotrzymywania wymaganych parametrów paliwa oraz powietrza dostarczanego do spalania. W praktyce eksploatacyjnej zdarza się często, że parametry te nie są ściśle dotrzymywane i to powoduje niewłaściwy przebieg procesu spalania i emisję dużych ilości sadzy.

Z powyższych rozważań wynika, że zastosowanie palników olejowych z rozpylaczami dwuczynnikowymi jest najlepszym sposobem na skuteczne rozwiązanie analizowanych dwóch problemów eksploatacyjnych przy spałaniu ciężkich paliw ciekłych.

Również trzeci z wymienionych wcześniej problemów, czyli podatność na częściowe lub całkowite zatykanie otworów paliwowych, rzadziej występuje przy zastosowaniu rozpylaczy dwuczynnikowych. Główna bowiem przyczyna tej dolegliwości leży w małych rozmiarach otworów paliwowych, co jest charakterystyczne dla rozpylaczy ciśnieniowych. W rozpylaczach dwuczynnikowych, w których sposób rozdrabniania paliwa jest inny niż w ciśnieniowych, otwory paliwowe mogą mieć większe średnice i przez to są mniej podatne na zatykanie.

Przy spalaniu lżejszych paliw ciekłych, w małych komorach spalania, uciążliwość powyższych problemów eksploatacyjnych jest z reguły znacznie mniejsza i powszechne zastosowanie znajdują prostsze konstrukcyjnie rozpylacze ciśnieniowe. Przy mniejszej bowiem lepkości paliwa stosunkowo łatwo można zapewnić wystarczającą dokładność rozpylania także przy tym sposobie rozpylania. Problemowi zatykania zapobiega się tu poprzez dokładne filtrowanie paliwa podawanego do rozpylacza.

W urządzeniach przemysłowych i komunalnych palniki olejowe najczęściej pracują przy jednej wydajności. Z jednej strony ogranicza to możliwość zmian wydajności cieplnej urządzenia, ale z drugiej daje szansę na zapewnienie poprawnego przebiegu procesu spalania oleju przy ustalonych, właściwie dobranych, parametrach substratów procesu.

#### 2.2. Płomienie olejowe

Płomienie olejowe charakteryzują się wysokimi zdolnościami radiacyjnymi i przez to dobrze spełniają rolę medium pośredniczącego w procesie przekazywania energii chemicznej paliwa, wyzwalanej w czasie spalania, do nagrzewanego obiektu. Jest to szczególnie istotne w takich warunkach spalania, gdy ogólny poziom temperatury w komorze nie jest wysoki. Sytuacja taka ma miejsce, na przykład, podczas rozgrzewania komór ze stanu zimnego bądź gdy czynnik odbierający ciepło jest z natury niskotemperaturowy (kotły wodne). W takich przypadkach dobre promieniowanie płomienia znacznie intensyfikuje proces przekazywania energii.

Wysokie zdolności radiacyjne płomieni olejowych wynikają przede wszystkim z dużej emisyjności tych płomieni, co jest rezultatem znacznej koncentracji cząstek sadzy posiadającej ciagłe widmo promieniowania. Sadza, jako produkt termicznego rozpadu węglowodorów, powstaje w dużych ilościach przy spalaniu paliw ciekłych. Z jednej strony zapewnia to wspomnianą wysoką emisyjność płomienia, lecz z drugiej stwarza niebezpieczeństwo występowania sadzy także poza obszarem płomienia i tym samym pojawienia się straty niecałkowitego spalania oraz efektu zanieczyszczenia środowiska naturalnego.

17

Parametry płomieni olejowych zależą zarówno od parametrów substratów, jak również od konstrukcji zastosowanego palnika oraz od warunków panujących w komorze spalania. Ta komplikacja wpływów sprawia, że nie ma prostych zależności pomiędzy parametrami spalania oleju oraz parametrami uzyskiwanego płomienia. Jest to sytuacja odmienna aniżeli w przypadku spalania paliw gazowych, do których sposobu i zakresu stosowanych urządzeń spalanie oleju jest najbardziej zbliżone.

Nie można zatem sformułować ogólnie słusznych prawidłowości dla wszystkich przypadków spalania paliw ciekłych. Dla przykładu, wzrost prędkości wypływu powietrza w przekroju wylotowym palnika może powodować różne skutki przy różnych konstrukcjach palników. Dla jednych rozwiązań następuje wówczas wzrost temperatury płomienia, a dla innych obniżenie. Podobnie może być z innymi parametrami substratów oraz płomienia.

W pracy prezentowane są rezultaty różnych badań autora wskazujące na możliwość występowania takich efektów. Określono mechanizm i warunki ich występowania.

Także emisja własna energii promieniowania płomienia olejowego, jako funkcja parametrów płomienia, zależy od szeregu czynników. Interesujące jest, w jakim zakresie, poprzez zmianę warunków spalania, można wpływać na wartość tej energii radiacyjnej i jak przez to może się zmieniać efektywność procesu przekazywania energii w komorze spalania.

Kompleksowej oceny wpływu różnych parametrów substratów procesu spalania paliwa ciekłego na parametry uzyskiwanych płomieni oraz na występujące w komorze spalania efekty cieplne można dokonać jedynie w warunkach laboratoryjnych. Taki cel postawił sobie autor w niniejszej pracy.

#### 2.3. Cel i zakres pracy

Głównym celem pracy jest przeprowadzenie kompleksowych badań procesu spalania paliw ciekłych pod kątem określenia prawidłowości pomiędzy warunkami, przy których jest spalane paliwo, a uzyskiwanymi efektami, czyli parametrami płomieni oraz cieplnymi skutkami ich obecności w komorze spalania.

Biorąc pod uwagę teoretyczną wiedzę o mechanizmach procesu spalania oraz prawach wymiany ciepła można postawić tezę, że na energetyczne efekty spalania paliw ciekłych główny wpływ wywierają następujące czynniki:

- jakość rozpylania paliwa, czyli rozmiary i rozkład średnic zbioru kropel powstającego za rozpylaczem,
- parametry powietrza u wylotu palnika: ilość, prędkość, kierunek wypływu,
- parametry komory spalania: stan cieplny, rozmiary, warunki przepływowe.

Jakość rozpylania jest uzależniona w zasadniczym stopniu od parametrów czynników przed rozpylaczem oraz od konstrukcji rozpylacza.

Badania umożliwiają głębsze poznanie mechanizmu występowania różnych oddziaływań oraz określenie wagi i zakresu wpływu na nie analizowanych parametrów. Pozwalają też na sformułowanie wynikających stąd zaleceń odnośnie do optymalnych warunków eksploatacji palników olejowych.

Potrzeba takich badań uzasadniona jest niedostatkiem wiedzy w tym zakresie przyczyniającym się do stosowania często niewłaściwych parametrów spalania paliw ciekłych, zwłaszcza w dużych komorach.

Konieczna, ze względu na koszty, laboratoryjna skala badań umożliwiła przeanalizowanie dosyć szerokiego zakresu parametrów spalania, obejmującego parametry najczęściej stosowane w rzeczywistych urządzeniach. W badaniach używano dwóch podstawowych typów rozpylaczy: ciśnieniowego oraz dwuczynnikowego, przy czym główny zakres badań zrealizowano przy zastosowaniu rozpylacza dwuczynnikowego, dającego szersze możliwości zmiany parametrów rozpylania. Uznano, że najbardziej istotne w przeciętnych warunkach użytkowania paliw ciekłych są dwa parametry procesu: jakość rozpylania paliwa i stosunek nadmiaru powietrza. Ich zatem wpływ analizowano przede wszystkim.

Dla przyjętej skali badań najbardziej odpowiednim paliwem był olej napędowy, którego właściwości są niemal analogiczne do szeroko stosowanego lekkiego oleju opałowego.

ALL THE STATE OF T

All a second sec

#### **3. WYBRANE BADANIA WSTĘPNE**

#### 3.1. Spalanie oleju przy użyciu rozpylacza ciśnieniowego

#### 3.1.1. Opis stanowiska i zakresu pomiarów

Podstawowym parametrem termicznym każdego płomienia jest jego temperatura. Dlatego temu parametrowi autor poświęcił główną uwagę w pierwszych swoich badaniach laboratoryjnych nad parametrami płomieni uzyskiwanych przy spalaniu oleju.

Prezentowane niżej badania przeprowadzone zostały na stanowisku, którego schemat ideowy pokazany jest na rysunku 3.1 [93].

Spalanie oleju zachodzi w pionowej, prostopadłościennej komorze wykonanej z blachy stalowej wyłożonej od wewnątrz warstwą substancji ognioodpornej. Komora ustawiona jest na metalowym stelażu stanowiącym obudowę pozostałych urządzeń stanowiska. Na stelażu zamontowany jest przewód paliwowy z rozpylaczem, którego wylot skierowany jest pionowo ku górze. Paliwo ze zbiornika, wyposażonego w poziomowskaz, podawane jest do rozpylacza za pomocą pompy zębatej z zaworem regulacyjnym.

Powietrze do spalania dostarczane jest z wentylatora i przepływa kolejno przez przepływomierz, przewód dolotowy oraz zamontowany na jego końcu zawirowywacz. Na rysunku 3.2 pokazano rozwiązanie wylotu palnika, a na rysunku 3.3 zastosowane w badaniach trzy zawirowywacze powietrza, różniące się polem przekroju wylotowego. Zawirowywacze wyposażone są w proste łopatki, których kąt odchylenia można dowolnie ustawić.

W przedniej ścianie komory znajduje się szczelina zamknięta szybą ze szkła kwarcowego pozwalająca na obserwację płomienia, a po usunięciu szyby - łatwy dostęp do palnika. W ścianie tylnej jest druga, węższa szczelina umożliwiająca wprowadzenie końcówki termopary i jej przesuw wzdłuż osi płomienia.

Spalanym paliwem był olej napędowy, który rozpylano za pomocą ciśnieniowego rozpylacza firmy Danfoss. W badaniach używano rozpylacza o wydajności nominalnej 1.25 kg/h, którą uzyskuje się przy ciśnieniu oleju przed rozpylaczem równym 0.7 MPa. W trakcie badań wynikła jednakże potrzeba zastosowania dodatkowych filtrów paliwa przed rozpylaczem w celu zapobiegania zatykaniu kanalików przelotowych w rozpylaczu, których rozmiary są rzędu 0.1-0.2 mm. Spowodowało to znaczny wzrost oporów przepływu, a przez to konieczność podniesienia ciśnienia przed rozpylaczem. Ostatecznie badania prowadzono przy stałym ciśnieniu oleju równym 1.7 MPa (mierzonym przed filtrami w czasie przepływu paliwa), co zapewniało wydajność rozpylacza równą 2.15 kg/h.

W badaniach zmieniano parametry powietrza doprowadzanego do spalania. Oceniano wpływ trzech parametrów powietrza na temperaturę otrzymywanego płomienia. Parametrami tymi były: stosunek nadmiaru powietrza, prędkość wypływu powietrza z palnika oraz kąt nachylenia łopatek zawirowywacza. Parametry te w czasie badań zmieniane były w następujących zakresach:

- stosunek nadmiaru powietrza: 0.41-1.44,
- prędkość wypływu powietrza: 0.67-11.98 m/s,
- kąt nachylenia łopatek: 0-75°.

Wartość stosunku nadmiaru powietrza odnosi się do strumienia powietrza dostarczanego z wentylatora i przepływającego przez zawirowywacz. Ponieważ komora spalania posiada szczelinę pomiarową, zatem nie jest szczelna, do płonącej żagwi dopływa również powietrze niekontrolowane ze względu na lekkie podciśnienie panujące w komorze. O intensywności spalania decyduje jednak to powietrze, które wypływa z palnika razem z paliwem, w jego bezpośrednim sąsiedztwie.



Rys. 3.1. Schemat stanowiska do pomiaru temperatury w płomieniach olejowych Fig. 3.1. Scheme of stand for measurements of temperature in oil flames





Zawirowywacz 1 D = 34 mmZawirowywacz 2 D = 54 mmZawirowywacz 3 D = 72 mm



Rys. 3.3. Zawirowywacze powietrza Fig. 3.3. Air swirl vanes

#### 3.1.2. Przebieg badań i wyniki pomiarów

W badaniach przeanalizowano 76 przypadków płomieni. Dla każdego z trzech zawirowywaczy prowadzono pomiary przy pięciu wartościach stosunku nadmiaru powietrza: 0.45, 0.75, 1.00, 1.20 i 1.40 oraz pięciu wartościach kąta odchylenia łopatek zawirowywacza: 0°, 30°, 45°, 60° i 75°. Kąt odchylenia łopatek mierzony jest od płaszczyzny przechodzącej przez oś zawirowywacza i dolną krawędź łopatki. Wykonano także pomiary temperatury dla płomienia uzyskanego bez wymuszonego przepływu powietrza wentylatorowego. Spalanie zachodziło tu w powietrzu naturalnie dopływającym z otoczenia płomienia. Przypadek ten badano z otwartą szczeliną obserwacyjną.

Temperaturę mierzono w punktach leżących w osi każdego płomienia. Pomiary wykonywano w punktach odległych od siebie o 1 lub 2 cm w zależności od wielkości gradientu temperatury, przy czym zaczynano pomiary od miejsca, w którym temperatura przekraczała 400°C. Ostatni punkt pomiarowy leżał w odległości 40 cm od wylotu rozpylacza i wynikało to z technicznych ograniczeń stanowiska. Dla większości płomieni temperatura zmierzona w tym ostatnim punkcie przyjmowała wartości w przedziale 600-800°C. W sporadycznych przypadkach były to wartości nieco wyższe.

Pomiary prowadzono przy użyciu termopary PtRh-Pt z odsłoniętą spoiną. Wyniki takich pomiarów są niższe od rzeczywistych wartości temperatury w mierzonych punktach o wielkość odchyłki spowodowanej promieniowaniem spoiny termopary. Dla danych warunków pomiarowych wartość tej odchyłki jest tym większa, im wyższa jest temperatura spoiny, zatem jakościowy charakter zmierzonego rozkładu temperatury się nie zmienia. Ponieważ dokładne obliczenie odchyłki pomiarowej jest trudne i wymagałoby znajomości jeszcze kilku dodatkowych parametrów, uznano, że dla potrzeb niniejszych badań nie jest niezbędne. Wzajemnego porównania uzyskanych płomieni i oceny wpływu analizowanych parametrów powietrza doprowadzanego do spalania na charakterystyki temperaturowe płomieni dokonano zatem na podstawie wartości bezpośrednich odczytów wskazań termopary.

Spośród wyznaczonych 76 osiowych rozkładów temperatury zaprezentowano tu, w różnych zestawieniach, 25 rozkładów wybranych płomieni. Na podstawie wykonanych pomiarów wyznaczono wartości średniej temperatury w osi płomienia i pokazano ich zależność od badanych parametrów. Średnią wyznaczono jako średnią ważoną, gdzie wagami były udziały długości odcinków, dla których przyjmowano stałą wartość temperatury, w całkowitej długości odcinka osi palnika, w którym wykonywano pomiary. Długość stałotemperaturowych odcinków wynikała z rozmieszczenia punktów pomiarowych.

Doboru pokazanych płomieni dokonano pod kątem zaprezentowania prawidłowości występujących w obrębie badanego zakresu parametrów spalania. Sporządzono odpowiednie zestawienia grup charakterystyk temperaturowych płomieni umożliwiające dokonanie oceny analizowanych wpływów.

Na rysunku 3.4 zestawiono cztery wykresy osiowych rozkładów temperatury w płomieniach otrzymanych przy użyciu zawirowywacza 2. Na wykresach tych, z których każdy dotyczy innej wartości stosunku nadmiaru powietrza, widać wpływ kąta nachylenia łopatek zawirowywacza na poziom uzyskiwanej temperatury i jej rozkład wzdłuż osi płomienia.

Na rysunku 3.5 zestawiono cztery inne wykresy rozkładów temperatury, gdzie widać wpływ zastosowanego zawirowywacza. Zawirowywacze różnią się rozmiarem zewnętrznej średnicy, a zatem także wielkością pola przekroju kanału, którym wypływa powietrze. Oznacza to, że przy tym samym stosunku nadmiaru powietrza różna jest prędkość wypływu powietrza. Poszczególne wykresy dotyczą różnych wartości stosunku nadmiaru powietrza oraz różnego kąta nachylenia łopatek zawirowywacza.



- Rys. 3.4. Wpływ kąta nachylenia łopatek zawirowywacza powietrza na rozkład temperatury w osi płomienia przy różnych wartościach stosunku λ nadmiaru powietrza – wyniki uzyskane dla zawirowywacza 2: a) λ=0.45, b) λ=1.00, c) λ=1.20, d) λ=1.40; ● kąt 0°, ¥ kąt 30°, ▲ kat 45°, ◆ kat 60°
- Fig. 3.4. Influence of angle of inclination of air swirler vanes on axis distribution of flame temperature for applying different λ values of air excess ratio results obtained when air swirler No 2 was used: a) λ=0.45, b) λ=1.00, c) λ=1.20, d) λ=1.40; inclination angle: 0°, ★ 30°, ▲ 45°, 60°

11 (3.72 m/s)

12 (1.39 m/s)

e3 (0.77 mili)

30

£1 (10.53 m/s)

12 (3.80 m/s)

a3 (1.07 m/a)

30

40

.

.

40



a

Rys. 3.5. Wpływ prędkości wypływu powietrza z palnika na rozkład temperatury w osi płomienia przy różnych wartościach kąta  $\alpha$  nachylenia łopatek zawirowywacza i różnych wartościach stosunku  $\lambda$  nadmiaru powietrza: a)  $\alpha=0^{\circ}$ ,  $\lambda=0.45$ , b)  $\alpha=45^{\circ}$ ,  $\lambda=0.45$ , c)  $\alpha=45^{\circ}$ ,  $\lambda=1.20$ , d)  $\alpha=60^{\circ}$ ,  $\lambda=1.20$ ;  $\bullet$  zawirowywacz 1, 🛦 zawirowywacz 2, 🗢 zawirowywacz 3, 🛪 przypadek płomienia bez powietrza doprowadzanego z wentylatora

Fig. 3.5. Influence of velocity of air flowing out from burner on axis distribution of flame temperature for applying different  $\alpha$  values of inclination angle of swirler vanes and different  $\lambda$  values of air excess ratio: a)  $\alpha = 0^{\circ}$ ,  $\lambda = 0.45$ , b)  $\alpha = 45^{\circ}$ ,  $\lambda = 0.45$ , c)  $\alpha = 45^{\circ}$ ,  $\lambda = 1.20$ , d)  $\alpha = 60^{\circ}$ ,  $\lambda = 1.20$ ; air swirler: • No 1, • No 2, ◆ No 3; ¥ no air delivered from fan





a



- Rys. 3.6. Wpływ stosunku nadmiaru powietrza na średnią temperaturę w osi płomienia przy różnych wartościach kąta  $\alpha$  nachylenia łopatek zawirowywacza: a)  $\alpha=0^{\circ}$ , b)  $\alpha=30^{\circ}$ , c)  $\alpha=45^{\circ}$ , d)  $\alpha = 60^{\circ}$ ; • zawirowywacz 1,  $\blacktriangle$  zawirowywacz 2, • zawirowywacz 3
- Fig. 3.6. Mean temperature in flame axis as a function of air excess ratio for applying different  $\alpha$ values of inclination angle of swirler vanes: a)  $\alpha=0^{\circ}$ , b)  $\alpha=30^{\circ}$ , c)  $\alpha=45^{\circ}$ , d)  $\alpha=60^{\circ}$ ; air swirler: ● No 1, ▲ No 2, ◆ No 3

25

Na rysunku 3.6 zestawiono z kolei wykresy, na którých pokazano wpływ stosunku nadmiaru powietrza na wartość średniej temperatury w osi płomienia, dla trzech stosowanych zawirowywaczy, przy różnych katach nachylenia łopatek.

#### 3.1.3. Analiza wyników

Przeprowadzone badania umożliwiają poznanie i ocenę wpływu podstawowych parametrów powietrza dostarczanego do spalania na temperaturę powstającego płomienia olejowego. Należy tu zaznaczyć, że niektóre z zaobserwowanych prawidłowości nie mają charakteru uniwersalnego, lecz są związane z zastosowanym ciśnieniowym sposobem rozpylania paliwa. Sposób rozpylania paliwa jest bardzo istotnym parametrem wpływającym na przebieg procesu spalania paliwa ciekłego i może decydować o charakterze oddziaływania innych parametrów na proces.

Jakkolwiek na podstawie rezultatów zaprezentowanych na każdym z rysunków 3.4-3.6 można dokonać analizy wpływu więcej niż jednego z badanych parametrów na temperaturę płomienia, to jednak wpływ właśnie jednego z tych parametrów jest, na poszczególnych rysunkach, widoczny najwyraźniej. Tak więc, na rysunku 3.4 jest to wpływ kąta nachylenia łopatek zawirowywacza, na rysunku 3.5 wpływ predkości wypływu powietrza z palnika, a na rysunku 3.6 wpływ stosunku nadmiaru powietrza.

Wzrost kąta nachylenia łopatek istotnie wpływa na rozkład temperatury wzdłuż osi płomienia. Następuje przybliżenie strefy wyższych temperatur do wylotu rozpylacza, a krzywą rozkładu temperatury wzdłuż osi płomienia charakteryzują większe gradienty. Obserwuje się najczęściej ogólny wzrost poziomu temperatury w płomieniu. Jest to efektem poprawy intensywności mieszania par paliwa i utleniacza w przestrzeni reakcyjnej. Efekt ten najwyraźniej jest zauważalny dla wyższych wartości stosunku nadmiaru powietrza. W tych przypadkach zastosowanie większego zawirowania powietrza jest zresztą konieczne, gdyż poprawia stabilność płomienia.

Jeżeli kąt nachylenia łopatek jest mały, czyli kierunek wpływu powietrza z palnika jest niemal równoległy do osi palnika, to przy większych prędkościach wypływu powietrza, które występują przy wyższych wartościach stosunku nadmiaru powietrza, następuje unoszenie płomienia i pogorszenie jego stabilności. Widać to szczególnie wyraźnie na przykładach płomieni przy niezawirowanym powietrzu (kat 0°), w których ze wzrostem stosunku nadmiaru powietrza rejon zapłonu coraz bardziej oddala się od wylotu palnika. Obserwuje się tu również znaczne obniżenie poziomu temperatury w płomieniu.

Na rysunku 3.4 nie zamieszczono rozkładów temperatury uzyskanych przy kącie 75°, gdyż różniły się one niewiele od przypadków z katem 60°, a ich umieszczenie pogarszałoby czytelność prezentowanych wykresów.

Najbardziej charakterystyczną prawidłowością, jaką zauważa się podczas analizy rozkładów temperatury pokazanych na rysunku 3.5, jest obniżenie temperatury w płomieniu pod wpływem wzrostu prędkości wypływu powietrza z palnika. Na poszczególnych wykresach zestawiono po trzy przypadki płomieni otrzymanych przy tym samym kącie odchylenia łopatek zawirowywacza oraz tej samej wartości stosunku nadmiaru powietrza, ale przy użyciu trzech różnych zawirowywaczy, a przez to przy zastosowaniu trzech wartości prędkości wypływu powietrza z palnika. Na wykresie a dla kąta 0° i stosunku nadmiaru powietrza 0.45 zamieszczono dodatkowo rezultaty pomiarów dla płomienia bez powietrza wentylatorowego. Na wszystkich wykresach najniższe temperatury występują w płomieniach otrzymanych przy użyciu zawirowywacza 1, w którym prędkość przepływu powietrza jest największa.

Wspomniany efekt obniżenia temperatury przy wzroście prędkości powietrza najwyraźniej jest widoczny przy słabym zawirowaniu powietrza i małych, niższych niż zawirowania powietrza, uzyskiwany przez powiększenie kąta odchylenia łopatek zawirowywacza, zmniejsza te różnice, co widać przy porównaniu wykresu a dla  $\alpha=0^{\circ}$ ,  $\lambda=0.45$  z wykresem b dla  $\alpha=45^{\circ}$ ,  $\lambda=0.45$ . Występujące niekiedy odwrócenie tej prawidłowości zauważono jedynie przy zawirowywaczach 2 i 3, pomiędzy którymi różnice predkości przepływu powietrza były znacznie mniejsze niż w stosunku do zawirowywacza 1 i co mogło być rezultatem oddziaływania innych, nie kontrolowanych systematycznie, czynników, jak na przykład: temperatury ścian komory.

27

Można stwierdzić, że zaobserwowany wpływ prędkości wypływu powietrza z palnika na temperaturę płomienia jest raczej nieoczekiwany, gdyż w większości typowych przypadków spalania paliw skutki są odwrotne, to znaczy wzrost prędkości wypływu powietrza powoduje wzrost temperatury płomienia. Dla potwierdzenia występowania zaobserwowanej prawidłowości autor przeprowadził odrębne badania laboratoryjne, w czasie których, w podobnych warunkach, spalany był olej napędowy oraz gaz koksowniczy. Badania wykazały, że kierunek zmian temperatury płomienia, będących rezultatem wzrostu prędkości wypływu powietrza, był, przy spalaniu gazu, odwrotny niż przy spalaniu oleju [102].

Przyczyną zaobserwowanego efektu jest negatywny wpływ wzrostu prędkości powietrza na jakość zachodzącego tu procesu rozpylania paliwa. Paliwo rozpylane było za pomocą klasycznego rozpylacza ciśnieniowego z komorą wirową. O jakości procesu rozpylania realizowanego w taki sposób decyduje szereg parametrów, a wśród nich również parametry ośrodka, do którego wypływa rozpylana ciecz. Wpływ parametrów ośrodka gazowego wynika głównie z oporu aerodynamicznego, na jaki napotyka wypływająca z rozpylacza ciecz. Im siła oporu jest większa, tym lepszą uzyskuje się jakość rozpylania, czyli tym mniejsze powstają krople cieczy.

O oporze aerodynamicznym decydują dwa parametry ośrodka gazowego: gęstość i predkość, przy czym chodzi tu o prędkość względną między gazem a cieczą wypływającą z rozpylacza. Przy nieruchomym ośrodku ta prędkość jest równa prędkości cieczy opuszczającej rozpylącz. Jeżeli gaz porusza się w tym samym kierunku co wypływająca z rozpylacza ciecz, to przy wzroście jego prędkości, w zakresie prędkości mniejszych niż predkość wypływu cieczy, następuje zmniejszenie prędkości względnej, a zatem zmniejszanie siły oporu aerodynamicznego. W wyniku tego następuje z jednej strony pogorszenie jakości rozpylania, a z drugiej zmniejszenie intensywności mieszania powietrza z paliwem, co w rezultacie powoduje obniżenie poziomu temperatury w płomieniu.

Najwyraźniej efekt ten występuje przy prostym, niezawirowanym wypływie powietrza. Zmiana kierunku wypływu powietrza, którą uzyskuje się przez odchylenie łopatek zawirowy wacza, wprowadza duże zmiany w tych relacjach.

Należy zauważyć że wyżej opisany mechanizm występuje wówczas, gdy prędkość wypływu cieczy z rozpylacza jest stosunkowo niewiele wyższa od prędkości przepływu powietrza w przekroju wylotowym palnika, co sprawia, że wprowadzone zmiany wartości tych prędkości mogą wyraźnie zmieniać wzajemne relacje między nimi. W badanym przypadku dokładne określenie prędkości cieczy na wylocie z rozpylacza nie jest łatwe, ale przybliżone obliczenia wskazuja, że jest to prędkość rzędu kilkunastu m/s. Przy innej metodzie rozpylania paliwa, na przykład w rozpylaczach dwuczynnikowych, efekt wzrostu predkości powietrza może być inny.

Na rysunku 3.6 zaprezentowano wyniki pomiarów opracowane w innej formie, niż to pokazano na rysunkach 3.4 i 3.5. Każdy z badanych płomieni reprezentowany jest tu przez jedna wartość temperatury. Jest to średnia temperatura w osi płomienia obliczona na podstawie przeprowadzonych pomiarów. Na poszczególnych wykresach przedstawiono wpływ stosunku nadmiaru powietrza na wartość średniej temperatury w płomieniach uzyskanych przy trzech różnych zawirowy waczach, lecz tym samym kącie odchylenia łopatek.

Przy małych kątach odchylenia łopatek (wykresy a i-b), czyli mniej intensywnym zawirowaniu powietrza, ze wzrostem stosunku nadmiaru powietrza w zakresie od 0.45 do 1.40 następował spadek średniej temperatury w płomieniu. Jest to, w zakresie wartości stosunku niższych od 1.00, efekt równie nieoczekiwany, jak omawiany wyżej wpływ prędkości powietrza i można sądzić, że wynikający z podobnych przyczyn, gdyż wzrost stosunku nadmiaru powietrza jest równoznaczny ze wzrostem prędkości wypływu tego powietrza. Jednakże w tym przypadku występuje jeszcze dodatkowy czynnik, jakim jest wzrost ilości powietrza doprowadzanego do spalania, którego wpływ na temperaturę płomienia jest również odmienny od spodziewanego.

Wyższy poziom temperatury występujący w płomieniu uzyskanym przy ilości doprowadzonego powietrza znacznie niższej od ilości stechiometrycznej aniżeli w płomieniu z ilością powietrza stechiometryczną bądź nieco większą wskazuje na to, że o temperaturze tej nie decyduje bezpośrednio globalna ilość powietrza doprowadzonego do palnika.

Na przebieg reakcji spalania mają wpływ wzajemne relacje ilości gazowych substratów procesu, czyli powietrza i par paliwa w miejscu zachodzenia tych reakcji. Istotna jest zatem wartość lokalnego stosunku nadmiaru powietrza w tym miejscu. To zaś jest ściśle uzależnione od jakości rozpylania, która decyduje o szybkości generowania par paliwa.

Jeżeli proces odparowywania jest wydłużony ze względu na większe rozmiary kropel, to rzeczywisty stosunek nadmiaru powietrza w miejscu reakcji chemicznej jest inny, zawsze większy, od tego globalnego, odniesionego do całkowitego strumienia paliwa doprowadzonego do rozpylacza. Trudno określić, o ile ten lokalny stosunek jest większy od globalnego, ale jest pewne, że przy wartościach stosunku globalnego bliskich wartości stechiometrycznej lub nieco wyższych wartości stosunku lokalnego są znacznie wyższe od wartości stechiometrycznej, a to wpływa na obniżenie poziomu temperatury w miejscu reakcji.

Można zatem stwierdzić, że zaobserwowany spadek temperatury płomienia, jaki nastąpił na skutek wzrostu stosunku nadmiaru powietrza doprowadzonego do palnika, jest łącznym efektem pogorszenia jakości rozpylania i zwiększenia lokalnego stosunku nadmiaru powietrza.

Ze wzrostem kąta odchylenia łopatek, czyli ze wzrostem intensywności zawirowania powietrza, obserwuje się spłaszczenie krzywych (rys. 3.6 c), a przy odpowiednio dużym zawirowaniu pojawiają się pewne optima w analizowanej zależności (rys.3.6 d). Widać zatem, także tutaj, że duże zawirowanie powietrza wprowadza istotne zmiany w postaci tych zależności, które obowiązują przy mniej intensywnym zawirowaniu powietrza.

Podsumowując analizę wpływu stosunku nadmiaru powietrza na poziom temperatury w płomieniu olejowym, należy także i tu podkreślić, że zaobserwowane prawidłowości obowiązują przy stosowanym w niniejszych badaniach sposobie i parametrach rozpylania i spalania. Przy innych parametrach rozpylania, a zwłaszcza innym sposobie rozpylania, gdy zmiana stosunku nadmiaru powietrza nie powoduje ubocznych skutków w postaci zmiany jakości rozpylania, bądź skutki te mają mniejszy zakres, charakter zależności ulegnie zmianie.

Dla przykładu, w rozpylaczach dwuczynnikowych prędkość gazowego czynnika rozpylającego, unoszącego cząstki rozpylanej cieczy, jest u wylotu z rozpylacza wielokrotnie wyższa od prędkości głównego powietrza spalania. W takim przypadku zmiany prędkości powietrza spalania wynikające ze zmiany stosunku nadmiaru powietrza nie wpływają istotnie na warunki rozpylania. Można więc oczekiwać, że przy takim rozpylaniu zmiana stosunku nadmiaru powietrza powoduje inne skutki, niż to miało miejsce w wyżej opisanych badaniach. 3.2. Spalanie oleju przy użyciu rozpylacza dwuczynnikowego

#### 3.2.1. Opis zakresu badań

Kolejne badania procesu spalania paliw ciekłych przeprowadzono przy użyciu drugiego z podstawowych typów rozpylaczy stosowanych w palnikach olejowych, a mianowicie rozpylacza dwuczynnikowego. Głównym celem tych badań było określenie rozmiarów skutków energetycznych możliwych do uzyskania, w komorze grzewczej pieca, przez zastosowanie zróżnicowanych parametrów rozpylania paliwa ciekłego.

Analizowano wpływ parametrów rozpylania oleju na dwa parametry charakteryzujące proces przekazywania energii w komorze spalania: temperaturę uzyskiwanego płomienia oraz strumień ciepła przekazywanego do ścian komory spalania. Badania prowadzono przy stałym strumieniu paliwa oraz stałych parametrach powietrza dostarczanego do spalania.

Badania prowadzono w komorze spalania opisanej w rozdziale 4 niniejszej pracy i pokazanej na rysunku 4.1. Dodatkowym elementem stanowiska laboratoryjnego, zainstalowanym przed palnikiem na czas prowadzenia niniejszych badań, był grzejnik powietrza rozpylającego.

Paliwo, olej napędowy, rozpylano za pomocą rozpylacza własnej konstrukcji, pokazanego schematycznie na rysunku 3.7. Jest to rodzaj rozpylacza dwuczynnikowego, w którym strumień czynnika gazowego zderza się ze wstępnie rozpyloną strugą cieczy [94]. Czynnikiem gazowym jest w tym przypadku sprężone powietrze. Strużki tego powietrza przepływają przez kanaliki rozmieszczone w głowicy rozpylacza i uderzają w strugę paliwa opuszczającą część ciśnieniową rozpylacza. Struga paliwa będącego już we wstępnej fazie rozpadu, wskutek zderzenia z wypływającym z kanalików z dużą prędkością powietrzem, ulega dodatkowemu rozczłonkowaniu. Poprzez zmianę ilości sprężonego powietrza można tu zmieniać jakość rozpylania zachowując stałą wydajność palnika. Skala zmian jakości rozpylania, jaką można osiągnąć poprzez zmianę ilości sprężonego powietrza, jest cechą charakterystyczną konkretnego rozwiązania rozpylacza i zależy od szczegółów konstrukcyjnych głowicy rozpylacza.



Rys. 3.7. Rozpylacz dwuczynnikowy stosowany w badaniach prezentowanych w rozdz. 3.2 Fig. 3.7. Configuration of twin fluid atomizer mouth used during tests presented in Chapter 3.2

W czasie niniejszych badań nie oceniano jakości rozpylania. Obserwowano natomiast i oceniano energetyczne skutki zmiany wybranych parametrów rozpylania paliwa. Zmieniano dwa parametry sprężonego powietrza: temperaturę i strumień. Badania prowadzono dla trzech wartości temperatury powietrza: 20, 100 i 200°C, natomiast ilość powietrza zmieniano w zakresie 0.18-0.83 kg/kg oleju. W efekcie zmian dwóch powyższych parametrów zmieniała się również prędkość wypływu powietrza z kanalików w zakresie od 10.4 m/s, dla przypadku 20°C i 0.18 kg/kg oleju, do 77.5 m/s dla przypadku 200°C i 0.83 kg/kg oleju.

Pozostałe parametry procesu spalania dla wszystkich badanych wariantów płomieni były stałe: strumień paliwa 3.5 kg/h, ciśnienie manometryczne paliwa przed rozpylaczem 0.35 MPa, stosunek nadmiaru powietrza 1.05 (jest to suma powietrza sprężonego i powietrza wentylatorowego). Powietrze z wentylatora przepływało przez zawirowywacz łopatkowy, którego łopatki tworzyły z osią palnika kąt 55°.

#### 3.2.2. Przebieg badań i wyniki pomiarów

Badania przeprowadzono dla 20 wariantów płomieni. W tablicy 3.1 zestawiono wartości parametrów sprężonego powietrza dla analizowanych płomieni. Jak widać, badano 7 różnych płomieni uzyskanych przy temperaturze sprężonego powietrza równej 20°C, 7 płomieni przy temperaturze 100°C oraz 5 płomieni przy temperaturze 200°C. Badano również płomień, który uzyskano bez dodawania sprężonego powietrza (0 kg/kg oleju).

W serii płomieni z temperaturą sprężonego powietrza 200°C przebadano tylko 5 wariantów, ponieważ przy zastosowanym podgrzewaczu powietrza nie było możliwe utrzymanie stabilnego poziomu tej temperatury przy ilościach powietrza niższych niż 0.40 kg/kg oleju.

Parametry sprężonego powietrza

Tablica 3.1

Temperatura °C							
2	20	1	00	200			
Płomień	Ilość pow.	Płomień	Ilość pow.	Płomień	Ilość pow.		
Nr	kg/kg oleju	Nr	kg/kg oleju	Nr	kg/kg oleju		
1	0.18	8	0.26	15	0.40		
2	0.29	9	0.40	16	0.50		
3	0.34	10	0.50	17	0.61		
4	0.39	11	0.58	18	0.67		
5	0.52	12	0.61	19	0.83		
6	0.67	13	0.67				
7	0.83	14	0.83				

Ze względu na czasochłonność i koszty prowadzenia badań w stanie ustalonym (potrzebny jest długi okres czasu, około 6 i więcej godzin, do nagrzania komory spalania i osiągnięcia stanu ustalonego) badania prowadzono w stanie nieustalonym.

Na podstawie pomiarów wzrastającej, z upływem czasu, temperatury zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni ścian komory oraz znajomości geometrycznych i fizycznych parametrów materiału ściany określano wartość strumienia ciepła pochłanianego przez ścianę w różnych momentach nieustalonego procesu nagrzewania. Do wyznaczenia chwilowych wartości strumienia ciepła na wewnętrznej powierzchni ściany komory zastosowano technikę rozwiązywania odwrotnego zagadnienia przewodzenia ciepła wraz z metodą najmniejszych kwadratów [6, 73, 107].

Strumień ciepła pobieranego przez ścianę komory jest miarą efektywności procesu przekazywania energii chemicznej paliwa, wyzwalanej w procesie spalania, do nagrzewanego

obiektu. Intensywność tego procesu, będącego rezultatem obecności płomienia w komorze, jest głównie funkcją parametrów płomienia, które z kolei zależą od parametrów rozpylania.

Wszystkie analizowane przypadki płomieni badano w identyczny sposób. Po zapaleniu palnika w zimnej komorze ustalano pożądane parametry paliwa oraz powietrza wentylatorowego i sprężonego. W przypadkach płomieni z podwyższoną temperaturą sprężonego powietrza ustabilizowany poziom tej temperatury, odpowiedni dla analizowanego wariantu płomienia, zapewniano za pomocą elektrycznego podgrzewacza.

Następnie nagrzewano komorę przez pewien okres czasu (najczęściej przez 90 min). Podczas nagrzewania, w 15-minutowych odstępach czasowych, wykonywano pomiary temperatury w sześciu punktach leżących na wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni bocznej ściany komory.

Na rysunku 3.8 pokazano rozmieszczenie punktów pomiaru temperatury na powierzchniach bocznej ściany komory. Punkty są usytuowane na linii równoległej do osi palnika i leżącej 10 cm poniżej dolnej krawędzi głównej szczeliny pomiarowej biegnącej wzdłuż tej ściany. Temperaturę mierzono za pomocą termopar NiCr-Ni.



Rys. 3.8. Rozmieszczenie punktów pomiaru temperatury na ścianie komory spalania Fig. 3.8. Location of temperature measurement sensors on wall of combustion chamber

W ten sposób określano poziom nagrzania ścian komory powyżej zimnego stanu początkowego, jaki osiągany był w identycznych okresach czasu, w rezultacie obecności wewnątrz komory badanych wariantów płomieni.

Dła każdego z badanych płomieni wykonywano także pomiar rozkładu temperatury w osi płomienia. Pomiar przeprowadzano po upływie okresu 90 minut od chwili włączenia palnika. Temperaturę w płomieniu mierzono za pomocą termopary PtRh-Pt z odsłoniętą spoiną, którą wsuwano do komory przez szczelinę pomiarową.

Ze względu na porównawczy charakter tych badań, przy których znajomość dokładnych wartości mierzonej temperatury płomienia nie była niezbędna, oraz z powodów analogicznych do przedstawionych w rozdziale 3.1.2, w dalszej analizie oparto się na bezpośrednich wynikach odczytów wskazań termopary.

Własności fizyczne materiału ściany komory (szamot), potrzebne do obliczeń strumieni ciepła, przyjęto według [43] jako zależne od temperatury t:

- współczynnik przewodzenia	a ciepła $\lambda = 0.82 + 0.00015 t$	W/m K,
- ciepło właściwe	c=880 + 0.23 t	J/kg K,
- gęstość	$\rho = 1800$	kg/m <sup>3</sup> .

W tablicy 3.2 podano przykładowe wyniki pomiarów chwilowej wartości temperatury na wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni bocznej ściany komory spalania, zmierzone w czasie nagrzewania komory za pomocą trzech płomieni: 5, 10 i 16 uzyskanych przy podobnej ilości sprężonego powietrza: 0.50 i 0.52 kg/kg oleju, lecz różnej temperaturze powietrza: 20, 100 i 200°C. Wyniki dotyczą punktu 4w na wewnętrznej powierzchni ściany oraz punktu 4z na zewnętrznej powierzchni (rysunek 3.8) i podano je w postaci nadwyżki zmierzonej temperatury nad temperaturę otoczenia komory spalania.

#### Tablica 3.2

Wyniki pomiarów nadwyżek temperatury: $\Delta T_w$ na wewnętrznej i $\Delta T_z$ na zewnę	trznej
powierzchni bocznej ściany komory odczytane w punktach 4w i 4z	

Pło- mień	Ilość spr. pow.	Temp. spr. pow.			Nadwyż	ka tempe	ratury <i>k</i>		
Nr	kg/kg oleju	°C	Czas min	15	30	45	60	75	90
5	0.52	20	$\Delta T_w$	140	240	325	348	410	463
5	0.52	20	$\Delta T_z$	7	26	55	77	103	128
10	0.50	100	$\Delta T_w$	235	334	390	444	500	530
10	0.50	100	$\Delta T_z$	9	31	57	85	115	145
16	0.50	200	$\Delta T_w$	240	345	408	470	530	563
10	0.50	200	$\Delta T_z$	10	33	58	88	120	158

Na rysunkach 3.9 - 3.12 pokazano wybrane wyniki pomiarów rozkładu temperatury w osiach płomieni oraz rezultaty obliczeń strumieni ciepła wykonanych w oparciu o pomiary temperatury wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni ściany prowadzone podczas nagrzewania komory.

Na rysunku 3.9 zestawiono wykresy osiowych rozkładów temperatury w badanych płomieniach. Na trzech kolejnych wykresach: a, b, c pokazany jest wpływ ilości sprężonego powietrza na rozkład temperatury w płomieniu dla trzech badanych wartości temperatury tego powietrza: 20°C, 100°C i 200°C. Dla lepszej czytelności wykresów zaprezentowano na nich po trzy wybrane płomienie z każdej serii pomiarowej (wykres a: płomienie 1, 4, 7, wykres b: płomienie 8, 10, 14, wykres c: płomienie 15, 16, 19).

Na wykresie d pokazano wpływ temperatury sprężonego powietrza na rozkład temperatury w płomieniu przy stałej ilości powietrza 0.83 kg/kg oleju (płomienie 7, 14 i 19).

Na rysunku 3.10 zestawiono cztery wykresy, na których pokazano wpływ ilości sprężonego powietrza zastosowanego w danym wariancie płomienia na wartość strumienia ciepła pochłanianego wówczas przez boczną ścianę komory spalania. Zaprezentowano strumienie ciepła dla jednego, przykładowo wybranego, punktu pomiarowego 4w - wykresy a i c, oraz wartości średnich strumieni ciepła wyznaczonych na podstawie wyników dla wszystkich sześciu punktów pomiarowych 1w-6w - wykresy b i d. Są to wartości chwilowe dotyczące dwóch momentów czasowych: 30. i 60. minuty, liczonych od chwili zapalenia palnika. Krzywe na wykresach odnoszą się do trzech wartości temperatury sprężonego powietrza.

Na każdym wykresie zamieszczono również wartości strumienia ciepła dla przypadku płomienia otrzymanego bez użycia sprężonego powietrza, czyli 0 kg/kg oleju, w celu uzyskania bardziej kompletnego obrazu analizowanej zależności.

Na rysunku 3.11 pokazano rozkład strumienia pochłanianego ciepła wzdłuż ściany komory, wyznaczony na podstawie wyników pomiarów w punktach 1w-6w. Są to wartości dotyczące tych samych, co w przypadku rysunku 3.10, dwóch momentów czasowych: 30. i 60. minuty okresu nagrzewania komory. Rezultaty dotyczą trzech płomieni: 4, 9 i 15 o podobnej ilości sprężonego powietrza: 0.39 i 0.40 kg/kg oleju, lecz różnej temperaturze.







Rys. 3.9. Wpływ ilości oraz temperatury sprężonego powietrza na rozkład temperatury w osi płomienia: - temperatura powietrza: a) 20°C, b) 100°C, c) 200°C, - ilość powietrza d) 0.83 kg/kg oleju

Fig. 3.9. Influence of temperature and amount of compressed air on axis distribution of flame temperature: temperature of air: a) 20°C, b) 100°C, c) 200°C; amount of air, d) 0.83 kg/kg of oil



0.00

0.20

0.40

0.60

llość sprężonego powietrza, kg/kg ol.

0.80

1.00



- Rys. 3.10. Wpływ ilości oraz temperatury sprężonego powietrza na wartość strumienia ciepła pochłanianego przez ścianę komory: - po upływie 30 min: a) w punkcie pomiarowym 4w, b) wartości średnie dla punktów 1w-6w, - po upływie 60 min: c) w punkcie pomiarowym 4w, d) wartości średnie dla punktów 1w-6w
- Fig. 3.10. Influence of temperature and amount of compressed air on heat flux absorbed by wall of chamber in two moments of time from initialization of fuel burning: 30 minute moment:
  a) in measure point of 4w, b) mean value for points 1w-6w, 60 minute moment: c) in measure point of 4w, d) mean value for points 1w-6w



Rys. 3.11. Wpływ temperatury sprężonego powietrza na rozkład strumienia ciepła wzdłuż ścian komory na przykładzie płomieni o podobnej ilości powietrza 0.39 i 0.40 kg/kg oleju: płomień 4 (20°C), płomień 9 (100°C), płomień 15 (200°C) – a) 30 min, b) 60 min

Fig. 3.11. Distribution of heat flux along wall of chamber for cases of flames with similar amount of compressed air of 0.39 and 0.40 kg/kg of oil but different values of air temperature: flame 4 (20°C), flame 9 (100°C), flame 15 (200°C) – a) 30 minute moment, b) 60 minute moment



Rys. 3.12. Zmiany wartości strumienia ciepła pochłanianego przez ścianę w punkcie 4w w czasie nagrzewania komory za pomocą tych samych płomieni co na rys. 3.11

Fig. 3.12. Time variation of a value of heat flux absorbed by wall in a measure point of 4w during periods of heating of chamber for flame cases the same as mentioned in figure 3.11

35

Na rysunku 3.12 pokazano z kolei szybkość obsiżania się strumienia ciepła pochłanianego przez ścianę komory w punkcie pomiarowym 4w w miarę upływu czasu obecności płomienia we wnętrzu komory, podczas 90-minutowego okresu rozgrzewania. Zależności dotyczą tych samych trzech płomieni co w przypadku rysunku 3.11.

#### 3.2.3. Analiza wyników

Na podstawie przeprowadzonych badań można dokonać oceny wpływu dwóch parametrów: *temperatury* i *ilości sprężonego powietrza* doprowadzanego do rozpylacza oleju na temperaturę płomienia oraz strumienie ciepła przejmowanego przez ściany komory spalania. Analiza w tym zakresie zostanie przeprowadzona głównie w oparciu o rezultaty zaprezentowane na rysunkach 3.9 i 3.10. Na rysunkach tych wpływ wymienionych parametrów jest wyraźnie widoczny. Zależności przedstawione na rysunkach 3.11 i 3.12 dodatkowo obrazują warunki cieplne panujące w komorze spalania i charakteryzują proces jej nagrzewania.

Porównując, pokazane na rysunku 3.11, strumienie ciepła dla 30. i 60. minuty widać, że z upływem czasu ich wartości się zmniejszają. Najwyraźniej efekt ten jest zauważalny przy najwyższych wartościach strumieni ciepła występujących w punktach pomiarowych 4w, 5w i 6w. Obniżanie strumieni ciepła jest rezultatem zmniejszającej się z upływem czasu różnicy temperatury pomiędzy czynnikami grzejącymi (płomień oraz spaliny) a ciałem nagrzewanym (ściany komory).

Zależność pokazana na rysunku 3.12 obrazuje szybkość zmiany parametrów cieplnych w komorze spalania w miarę zbliżania się do stanu ustalonego. Dla różnych płomieni postać zależności jest podobna, widać zatem, że w stanach nieustalonych dominujący jest tu wpływ własności cieplnych nagrzewanej komory.

Jeżeli chodzi o ocenę wpływu parametrów sprężonego powietrza, to na wstępie należy zauważyć, że ilości tego powietrza stosowane w badaniach są wielokrotnie mniejsze od ilości głównego powietrza doprowadzanego do spalania (od kilkunastu do ponad trzydzieści razy). Oznacza to, że zastosowanie sprężonego powietrza praktycznie nie wpływa na poziom całkowitej entalpii substratów na wlocie do komory spalania. Zaobserwowane efekty cieplne, które wystąpiły w komorze spalania po zastosowaniu tego powietrza, są zatem rezultatem uzyskanych tym sposobem zmian w przebiegu procesów rozpylania i spalania paliwa ciekłego.

Z licznego zbioru otrzymanych rezultatów wybrano do omówienia i prezentacji kilka zestawów, które pokazują występujące zależności.

Analiza rysunku 3.10 wskazuje, że dla wszystkich badanych serii płomieni, charakter zależności pomiędzy *ilością sprężonego powietrza* oraz strumieniem ciepła pochłanianego przez ściany komory jest podobny. Analogiczne prawidłowości występują również dla pozostałych punktów pomiarowych i momentów czasowych.

Widać, że istnieje pewna charakterystyczna wartość tego parametru mieszcząca się w przedziale 0.3-0.5 kg/kg oleju, przy której uzyskiwano najwyższe strumienie ciepła pochłanianego przez ścianę komory. Zarówno przy zmniejszaniu, jak i zwiększaniu ilości powietrza w stosunku do tej wartości następuje obniżenie intensywności nagrzewania ścian komory.

Równocześnie obserwuje się, że płomienie, przy których intensywność nagrzewania ścian jest najwyższa, charakteryzują się najniższym poziomem temperatury. Na rysunku 3.9 na wykresach a, b, c dotyczących różnych wartości temperatury sprężonego powietrza wyraźnie widać, że najniższą temperaturę mają płomienie, które uzyskano przy ilości sprężonego powietrza mieszczącej się w zakresie 0.39-0.50 kg/kg oleju, czyli te, przy których strumienie ciepła były najwyższe. Dla płomieni otrzymanych przy temperaturze sprężonego powietrza równej 20°C ta charakterystyczna wartość jest bliższa 0.3 kg/kg oleju, natomiast przy wyższej temperaturze powietrza (100°C i 200°C) bliższa 0.4 - 0.5 kg/kg oleju.

Stwierdzona prawidłowość występowania wyższej intensywności przekazywania ciepła przez płomień, który ma niższą temperaturę, jest z pozoru nieoczekiwana, lecz, jak to pokazane zostanie w dalszej części pracy, typowa dla płomieni olejowych.

Interesujący jest również efekt występowania wspomnianej charakterystycznej ilości sprężonego powietrza, przy której płomień ma najniższą temperaturę.

Przyczyną obniżenia temperatury w płomieniu olejowym jest najczęściej gorsza jakość rozpylania paliwa. W rozpylaczu użytym w niniejszych badaniach zmiany jakości rozpylania, jakie uzyskuje się w wyniku zwiększania strumienia sprężonego powietrza, mają specyficzny charakter. Wykazały to pomiary prowadzone w ramach innych badań, których autorzy wykorzystywali ten sam rozpylacz [87]. Dodawanie sprężonego powietrza powoduje, w początkowym zakresie zmian tego strumienia, wzrost rozmiarów kropel paliwa. Największe średnice kropel występują przy ilościach powietrza w zakresie 0.30-0.35 kg/kg oleju. Przy dalszym zwiększaniu ilości sprężonego powietrza obserwowano zmniejszanie rozmiarów kropel.

Taki charakter wpływu wzrastającej ilości czynnika gazowego na jakość rozpylania cieczy nie jest typowy dla rozpylaczy dwuczynnikowych. Najczęściej zwiększanie ilości czynnika gazowego, w całym zakresie tego wzrostu, powoduje poprawę jakości rozpylania. Natomiast wystąpienie efektu pogorszenia rozpylania w rezultacie wzrostu strumienia czynnika gazowego jest możliwe w przypadku pewnej grupy rozpylaczy dwuczynnikowych nazywanej rozpylaczami o zewnętrznym mieszaniu [49], do której zaliczyć można stosowany tu rozpylacz.

W rozpyłaczach tych proces rozpylania zachodzi dwustopniowo. Pierwszy stopień to klasyczne rozpylanie ciśnieniowe z zawirowaniem rozpylanej cieczy, a drugi to intensyfikacja procesu na skutek zderzenia wypływającej strugi cieczy ze strumieniem sprężonego gazu. W tym skomplikowanym układzie przepływu obu czynników, w pewnym zakresie wzrostu strumienia czynnika gazowego, może dochodzić do obniżania wartości głównej siły dezintegrującej strugę cieczy i wówczas występuje pogorszenie jakości rozpylania.

Wyjaśnienie takiego przebiegu procesu jest następujące. Przy braku przepływu sprężonego powietrza rozpylacz działa jak klasyczny ciśnieniowy, zapewniając wyjściową jakość rozpylania. Wprowadzenie małych ilości sprężonego powietrza, przy niezmienionej prędkości wypływu paliwa z części ciśnieniowej, powoduje zmniejszenie względnej prędkości ruchu sąsiadujących ze sobą czynników: cieczy i gazu, przez co pogarsza się skuteczność rozpylania. Efekt ten wzrasta ze wzrostem ilości powietrza i osiąga swoje maksimum przy takiej wartości strumienia powietrza, przy której prędkości obu tych czynników stają się równe. Przy dalszym zwiększaniu strumienia powietrza jego prędkość coraz bardziej przewyższa prędkość wypływu oleju, co prowadzi do stopniowej poprawy jakości rozpylania.

Podobny jakościowo efekt wzrostu średnic kropel powstających przy relatywnym wzroście ilości sprężonego powietrza, jaki stwierdzono przy rozpylaczu stosowanym w niniejszych badaniach, uzyskali autorzy pracy [76]. W swoich badaniach wyznaczali różne charakterystyki pracy rozpylacza analogicznego typu. Stwierdzone zostało, że przy wysokich ciśnieniach oleju i niskich prędkościach sprężonego powietrza dominuje efekt rozpylania ciśnieniowego. Przy niskich ciśnieniach oleju, a wyższych prędkościach powietrza dominuje efekt rozpylania pneumatycznego. Przy parametrach pośrednich pojawia się taki stan, przy którym rozpylanie jest najgorsze.

Z powyższych rozważań wynika, że zarówno zakres, jak i sposób wpływu ilości sprężonego powietrza doprowadzanego do rozpylacza na efekt poprawy bądź pogorszenia jakości rozpylania są ściśle związane z typem rozpylacza i szczegółową konstrukcją głowicy

rozpylacza. Decydują one bowiem o przebiegu procesów przepływowych oraz wzajemnego oddziaływania obu czynników: rozpylanego i rozpylającego, zachodzących w obrębie i w bezpośrednim sąsiedztwie wylotu rozpylacza, od czego bardzo istotnie zależy jakość rozpylania. Dlatego też stwierdzone tu prawidłowości są słuszne jedynie dla tego konkretnego rozwiązania rozpylacza. Przy nieco tylko zmienionej konstrukcji głowicy rozpylacza mogą wystąpić istotne zmiany, zarówno ilościowe, jak i jakościowe, w charakterze wpływu ilości czynnika gazowego doprowadzanego do rozpylacza na parametry uzyskiwanego płomienia, na co wskazują inne badania autora [103].

Odnośnie do wpływu drugiego z badanych parametrów, czyli *temperatury sprężonego powietrza*, można stwierdzić, że uzyskane rezultaty wskazują na to, że wzrost tej temperatury powoduje obniżenie temperatury płomienia. Pokazane jest to na rysunku 3.9 *d*, gdzie są zaprezentowane rozkłady temperatury zmierzonej w osiach płomieni uzyskanych przy tej samej ilości sprężonego powietrza równej 0.83 kg/kg oleju, lecz różnej jego temperaturze. Obniżeniu temperatury płomienia towarzyszy natomiast wzrost strumienia ciepła przejmowanego przez ściany komory spalania, co z kolei pokazują zależności przedstawione na rysunkach 3.10 - 3.12.

Skutkiem wzrostu strumienia ciepła docierającego do ścian komory jest szybszy wzrost temperatury ścian. Widać to na przykładzie wyników pomiarów przedstawionych w tablicy 3.2. Po takich samych okresach czasu rozgrzewania komory wyższe wartości temperatury ścian odnotowano dla płomieni uzyskiwanych przy wyższej temperaturze sprężonego powietrza.

Zaobserwowana prawidłowość obniżenia temperatury płomienia w wyniku wzrostu temperatury sprężonego powietrza doprowadzanego do rozpylacza jest kolejną, nietypową dla spalania, jeżeli chodzi o zwrot, tendencją oddziaływania parametrów substratów na parametry płomienia. Z reguły wzrost temperatury powietrza doprowadzonego do obszaru reakcji powoduje wzrost szybkości procesu, a przez to również wzrost temperatury w tym obszarze. W niniejszych badaniach uzyskano skutek odwrotny. Oznacza to, że poza efektem energetycznym wynikającym z wyższej entalpii, podgrzane powietrze wywołuje tu także inne skutki, których efekt jest większy od energetycznego i odwrotny co do kierunku.

Obniżenie temperatury płomienia jest niewątpliwie wyrazem niższej intensywności spalania paliwa. Prawdopodobnie jest to rezultat zwiększonego wydzielania sadzy w bezpośrednim sąsiedztwie wylotu rozpylacza, do czego dochodzi wskutek szybszego, niż przy zimnym powietrzu, kontaktu paliwa z gorącym czynnikiem. Strumień podgrzanego powietrza zderza się ze strugą paliwa w obrębie głowicy rozpylacza; następuje odparowanie części paliwa i jego termiczny rozpad prowadzący do tworzenia się sadzy w obszarze lokalnego niedoboru tlenu. Prowadzi to do obniżenia intensywności reakcji spalania i temperatury płomienia, natomiast wzrastają rozmiary płomienia, co można było zaobserwować w czasie eksperymentów. Większa zawartość sadzy w płomieniu przyczynia się do wzrostu emisyjności płomienia, czyli do podwyższenia jego zdolności grzejnych. Stąd też obserwuje się wówczas wzrost strumienia ciepła przekazywanego do ścian komory.

Wzrost temperatury sprężonego powietrza powoduje także wzrost prędkości jego wypływu ze względu na obniżenie gęstości. Widać jednak, że skutki tym wywołane są w tym przypadku znacznie mniejsze od wpływu samej temperatury.

Z zaprezentowanych badań wynika, że za pomocą obu analizowanych parametrów sprężonego powietrza: *ilości* i *temperatury* można istotnie wpływać na proces spalania paliwa ciekłego. Jakkolwiek charakter i zakres oddziaływania na proces spalania poprzez te parametry zależą od konstrukcji używanego rozpylacza i trudno tu sformułować jakieś ogólnie słuszne prawidłowości, to jednak widać, że możliwości te są warte uwagi.

Można ocenić, że w niniejszych badaniach różnice pomiędzy wartościami strumieni ciepła pochłanianego przez ściany komory spalania dochodzą maksymalnie do 20%. Oznacza to, że poprzez dobór odpowiednich parametrów czynników przed palnikiem można uzyskać duże zmiany w procesie wymiany ciepła w komorze spalania, które zapewniają osiągnięcie istotnych efektów energetycznych.

the state of the s

# 4. EKSPERYMENTALNE BADANIA WŁASNOŚCI PŁOMIENI OLEJOWYCH

#### 4.1. Stanowisko badawcze i zakres badań

W celu wykonania kompleksowych badań spalania paliwa ciekłego przygotowano odpowiednie stanowisko laboratoryjne, którego schemat pokazany jest na rys. 4.1. Wykorzystano do tego komorę, używaną wcześniej do badań procesów spalania paliw gazowych [86], wykonaną w kształcie prostopadłościanu o wymiarach wewnętrznych 0.69x0.72x1.05 m, posiadającą szczelinę pomiarową usytuowaną na ścianie bocznej wzdłuż osi otworu palnikowego. Ściany komory o grubości 72 mm wykonane są z ogniotrwałego szamotu. Rozmiary komory umożliwiają spalanie w niej lekkiego oleju opałowego w ilości około 4.0 kg/godz, przy przeciętnych parametrach rozpylania. Przy średniej wartości opałowej oleju rzędu 42.5 MJ/kg daje to moc cieplną komory rzędu 50 kW.

Badanie zjawiska spalania przy tej mocy cieplnej palnika, która jest zbliżona do mocy cieplnej dużej grupy rzeczywistych komór spalania, daje możliwość wykorzystania zdobytej wiedzy do analizy procesów rzeczywistych.

Celem, jaki sobie postawiono, było przede wszystkim zbadanie wpływu parametrów rozpylania oraz spalania paliwa ciekłego na energetyczne charakterystyki płomieni. Należało zatem uzyskać płomienie olejowe o tej samej mocy cieplnej, czyli tym samym strumieniu oleju, natomiast różniących się parametrami rozpylania. Potrzeby tej nie można było zrealizować posługując się standardowymi rozwiązaniami rozpylaczy olejowych, gdyż w takich rozpylaczach zmiana parametrów rozpylania pociąga za sobą równocześnie zmianę strumienia wypływającego paliwa. Dla zrealizowania zaplanowanego programu badawczego należało więc zaprojektować, wykonać i dopracować dla potrzeb użytkowych odpowiedni rozpylacz.

Wykorzystując swoje wcześniej zdobyte doświadczenia w konstruowaniu palników olejowych przeznaczonych do komór spalania kotłów energetycznych [39, 40, 102, 112] autor opracował takie rozwiązanie rozpylacza i całego palnika przeznaczonego do spalania lekkiego oleju opałowego, który umożliwiał zrealizowanie założonych potrzeb badawczych. Na rysunku 4.2 pokazano schemat końcówki palnika olejowego stosowanego w niniejszych badaniach.

Jest to rozpylacz o nieco innej konstrukcji aniżeli ten, którego używano w badaniach opisanych w rozdziale 3.2. Rozpylacze te różnią się rozmieszczeniem kanalików powietrza rozpylającego w części wylotowej. W niniejszej wersji wyloty tych kanalików zbliżone są, maksymalnie jak to jest możliwe, do wylotu kanalika paliwowego. Uzyskano przez to znaczną poprawę efektywności wykorzystania gazowego czynnika rozpylającego. Nastąpiła również jakościowa zmiana wpływu ilości powietrza rozpylającego na rozmiary powstających kropel. Nie występuje tu bowiem, w żadnym zakresie wzrostu ilości tego powietrza, efekt pogorszenia jakości rozpylania, jak to stwierdzono podczas wspomnianych poprzednich badań, w których używano rozpylacza o konstrukcji niewiele różniącej się od wersji niniejszej.

Zasada działania rozpylacza jest podobna do poprzedniego. Strumień niewysoko sprężonego powietrza wypływającego kilkoma otworkami zderza się ze strugą oleju w miejscu jej wypływu z pierwszej części rozpylacza. W tej pierwszej części, którą można nazwać ciśnieniową, strudze cieczy zostaje nadany wstępny ruch wirowy, a u jej wylotu ma miejsce wstępne rozpylenie paliwa. Odpowiednie rozmieszczenie kanalików powietrza rozpylającego sprawia, że wypływające z nich powietrze intensyfikuje proces rozbicia strugi oleju.

Rozpylanie oleju zachodzi tu zatem na skutek oddziaływania dwóch czynników. Pierwszym jest energia kinetyczna wirowego ruchu oleju, który jest wywołany przez ciśnienie



Rys. 4.1. Schemat stanowiska laboratoryjnego do badania spalania paliwa ciekłego Fig. 4.1. Scheme of laboratory stand for liquid fuel combustion tests



Rys. 4.2. Końcówka palnika olejowego z rozpylaczem Fig. 4.2. Configuration of oil burner mouth

41

oleju przed rozpylaczem oraz odpowiednią konstrukcję wnętrza pierwszej części rozpylacza. Drugim czynnikiem jest energia kinetyczna strumienia powietrza zderzającego się z wypływającą cieczą.

Sprężone powietrze spełnia tutaj rolę czynnika wspomagającego rozpylanie. Wzrost ilości powietrza intensyfikuje proces rozczłonkowywania strugi oleju. Po odcięciu dopływu tego powietrza olej jest również rozpylany, lecz jakość procesu jest gorsza.

Wartość ciśnienia oleju przed rozpylaczem decyduje o wydajności palnika i za pomocą tego parametru regulowano strumień spalanego paliwa, natomiast parametry rozpylania zmieniano za pomocą ilości powietrza rozpylającego.

Paliwem używanym w badaniach był olej napędowy letni, którego własności energetyczne i fizyczne są niemal analogiczne do lekkiego oleju opałowego stosowanego w ogrzewnictwie. W tablicy 4.1 podano podstawowe parametry spalanego oleju.

Tablica 4.1

	Skład ele % gra	mentarny mowe	Gęstość w 20°C	Wartość opa łowa	
С	h	0	S	kg/m <sup>3</sup>	MJ /kg
86.7	13.0	0.2	0.1	858	42,83

Strumień spalanego oleju kontrolowano podwójnie. Główny pomiar, pozwalający na ciągłą kontrolę, dokonywany był za pomocą rotametru specjalnie przystosowanego do tego celu przez producenta przyrządu. Pomiar sprawdzający polegał na dokonywaniu, co pewien okres czasu, odczytów zmian poziomu oleju w cylindrycznym zbiorniku, który był wyposażony w poziomowskaz.

Główne powietrze do spalania doprowadzano z wentylatora, a jego strumień wyznaczano za pomocą zwężki mierniczej. Strumień sprężonego powietrza wspomagającego rozpylanie kontrolowano za pomocą rotametru, natomiast jego ilość regulowano precyzyjnym zaworem redukcyjnym zainstalowanym na wylocie ze zbiornika sprężarki.

Temperaturę w płomieniu oraz temperaturę spalin we wnętrzu komory spalania mierzono za pomocą termoelementu PtRh-Pt zamontowanego w podwójnie ekranowanej termoparze odciągowej produkcji IFRF Ijmuiden w Holandii, temperaturę wewnętrznej powierzchni ścian komory za pomocą termopar płaszczowych NiCr-Ni, natomiast temperaturę spalin na wylocie z komory za pomocą termopary płaszczowej PtRh-Pt.

Spadek ciśnienia na zwężce oraz ciśnienie manometryczne powietrza wentylatorowego mierzono manometrami cieczowymi, natomiast ciśnienia manometryczne powietrza sprężonego manometrami tarczowymi. Prowadzono również pomiary ciśnienia otoczenia i temperatury w hali laboratoryjnej.

Jednym z parametrów mierzonych w komorze spalania był strumień energii promienistej padającej na ściany komory, czyli tak zwane opromieniowanie ścian komory. Gęstość opromieniowania mierzono przy użyciu elipsoidalnego radiometru całkowitego promieniowania.

Dla części płomieni prowadzono również pomiary koncentracji sadzy. Pomiary te wykonywano przy użyciu specjalnej sondy do pomiaru stałych cząstek. Obydwa wyżej wymienione przyrządy: radiometr i sonda do sadzy zostały zakupione, podobnie jak termopara odciągowa, w IFRF w Ijmuiden.

Skład spalin określano za pomocą analizatora typu Infralyt 4000.

Głównym parametrem rozpylania mierzonym dla każdego badanego płomienia była średnia średnica Sautera zbioru kropel paliwa opuszczającego rozpylacz.

Mikrostruktura strugi kropel powstającej w wyniku rozpylania ma decydujący wpływ na przebieg spalania i własności uzyskiwanego płomienia. W technice spalania, jak i kilku innych procesach, rzeczywisty zbiór kropel reprezentowany jest przez średnicę Sautera [5, 57, 94]. Średnicę Sautera początkowego zbioru kropel paliwa za rozpylaczem wyznaczano dla stanu zimnego, przy niezapalonej strudze, dwoma różnymi metodami. Posługiwano się analizatorem widma kropel typu AWK oraz metodą wyłapywania na płytkę pokrytą warstwą sadzy i zliczania pod mikroskopem.

Do pomiaru temperatury w różnych punktach płomienia i w pozostałych punktach pomiarowych znajdujących się wewnątrz komory, pomiaru koncentracji sadzy oraz gęstości opromieniowania ścian komory posługiwano się urządzeniem umożliwiającym mechaniczny przesuw czujnika pomiarowego i jego precyzyjne sytuowanie w dowolnym miejscu obszaru pomiarowego. Urządzenie to było ustawione obok szczeliny pomiarowej w ścianie komory i przystosowane do zamocowania na nim wszystkich używanych sond pomiarowych. Wykorzystano go również przy określaniu rozmiarów płomieni.

Większość pomiarów prowadzona była w stanie quasi-ustalonym komory spalania, który osiągano po okresie 6-8 godzin w zależności od wariantu badanego płomienia. Pewną część pomiarów prowadzono także w okresie nagrzewania komory w celu zbadania, w jakim stopniu stan cieplny komory spalania wpływa na parametry powstającego płomienia.

Wykony wanie pomiarów w stanie ustalonym komory dla jednego płomienia, wówczas gdy nie mierzono zawartości sadzy, zajmowało około 2.5 godz. Natomiast dla tych płomieni, w których mierzono również koncentrację sadzy, pomiary trwały około 5 godzin.

Pomiary parametrów płomieni przy nagrzewaniu komory spalania wykonywano w innym, zmniejszonym w porównaniu do pomiarów w stanach ustalonych, zakresie, gdyż parametry te zmieniały się z upływem czasu i dlatego konieczne było skrócenie czasu trwania pomiarów. Parametry mierzono w znacznie mniejszej ilości punktów i pomiary dla jednego stanu cieplnego trwały około 10 minut. Najszybciej zmieniała się temperatura wewnętrznej powierzchni ścian oraz gęstość opromieniowania ścian. Gęstość opromieniowania mierzono w dziewięciu punktach, co wyjaśniono w rozdziale 4.2.3, i zajmowało to okres około 2 minut. Jako moment pomiaru danego stanu cieplnego przyjmowano chwilę, w której dokonano odczytu gęstości opromieniowania w piątym punkcie pomiarowym, co następowało po upływie 1 minuty od rozpoczęcia pomiarów dla tego stanu.

W niniejszym rozdziale zaprezentowane zostaną rezultaty badań uzyskanych przy strumieniu oleju 3.8 kg/h, co odpowiada mocy cieplnej 45.2 kW oraz przy strumieniu 3.3 kg/h, co odpowiada mocy 39.3 kW. Zróżnicowanie wydajności palnika, ograniczone jednak rozmiarami komory spalania i wielkością uzyskiwanego płomienia, wprowadzono po to, aby ocenić także wpływ pojemności cieplnej ścian komory i jej rozmiarów na parametry powstającego płomienia olejowego.

W tablicy 4.2 zestawiono parametry rozpylania i spalania badanych płomieni. Przy strumieniu oleju 3.8 kg/h przebadano następujące warianty płomieni:

- sześć płomieni (nr 1-6) o jednakowych parametrach rozpylania (średnica Sautera zbioru kropel rozpylonego paliwa równa d<sub>s</sub> =19 μm) oraz różnych parametrach spalania (stosunek nadmiaru powietrza zmieniano w zakresie 0.96-1.50),
- sześć płomieni (nr 7-12) o jednakowych parametrach spalania (stosunek nadmiaru powietrza równy 1.20, wartość ta obejmuje łącznie strumienie powietrza wentylatorowego i rozpylającego) oraz różnych parametrach rozpylania (średnica Sautera rozpylanego paliwa zmieniała się w zakresie 8-34 μm),
- osiem płomieni (nr 13-20) o stałych parametrach rozpylania i spalania (średnica Sautera 19 μm, stosunek nadmiaru powietrza 1.20) przy rosnącym poziomie temperatury w komorze w trakcie jej nagrzewania od stanu zimnego.

42

Przy strumieniu oleju 3.3 kg/h przebadano sześć płomieni (nr 21-26) o jednakowej wartości 1.20 stosunku nadmiaru powietrza, lecz różnych parametrach rozpylania (średnica Sautera rozpylanego paliwa zmieniała się w zakresie 9-44 µm).

		Parame	try badanyo	h płomieni		Tablica 4.2
		Tatante	uy badailyc		~	
Płomień	oleju	oleju	Stosunek	rozpyl.	Srednica Sautera	Czas od uruchom.
Nr	kg/h	МРа	powietrza	kg pow./ kg oleju	kropel pal. µm	palnika <i>min</i> .
1			0.96			
2			1.06			po osiągn.
3			1.17			stanu
4	3.8	0.460	1.29	0.095	19	ustalonego
5			1.36	a set of the set of th		
6			1.50			
7				0	34	
8		-		0.095	19	po osiągn.
9		0.460		0.190	13	stanu
10	3.8	0.460	1.20	0.310	10	ustalonego
		1000		0.430	9	
12				0.600	8	
13		and the second				30
14			in a second second			60
15						90
10	2.0	0.460	1.00	0.005	10	120
1/	3.8	0.460	1.20	0.095	19	150
18			111 A			210
19						270
20				0	4.4	330
21				0 100	44	
22		-11- p-1-		0.100	28	po oslagn.
23	22	0 272	1.20	0.200	10	stanu
24	3.3	0.372	1.20	0.320	12	ustaionego
25		1000	1. COM 1. C	0.420	10	
20				0.300	9	

Przebadano więc 26 płomieni o różnych parametrach rozpylania i spalania zbliżonych do wartości stosowanych w praktyce.

# 4.2. Sposób przeprowadzania pomiarów

#### 4.2.1. Pomiar temperatury

Pomiary temperatury w płomieniu oraz wewnątrz komory prowadzono w poziomej półpłaszczyźnie przechodzącej przez oś palnika w jej części leżącej pomiędzy osią palnika a ścianą komory od strony szczeliny pomiarowej. Jak już wcześniej wspomniano, pomiary wykonywano za pomocą, przymocowanej do urządzenia przesuwnego, termopary odciągowej, której końcówkę umieszczano w wybranym punkcie pomiarowym. Pomiary prowadzono w szeregu punktów płomienia oraz pozostałej części komory spalania.

1.05 76.0 ā So 0.81 E 0.26 0.65 0.23 0.49 płomień 12 0.17 0.12 0.33 0.06 0.19 IEN 0.02 Σ 0.07 0.00 0 0.04 0.05 0.055 ~ 0.00 0.02 0.000 P., ε 0.301 0.00 0.05 0.10 0.20 0.25 0.15 E 1.05 86 So 0 Ε 0.44 0.82 4 0 0.37 0.68 0.52 płomień 7 0.26 0.38 00 EŃ 0 0.09 IWO 0.22 0.00 00.01 -2 0.000 0.08 ۵. Ξ 0.09 0.00 0.02 0.04 0.06 0.08 E 0.00 0.05 0.15 0.20 0.30 0.10 0.25

<

m

7 i 12 płomieni and 12 w przypadku p imes cases: 7 ar flames spalani two for Rozmieszczenie punktów pomiarowych: A - wewnątrz płomieni oraz B - wewnątrz komory Arrangement of measurement points: A - inside flames and B - inside combustion chamber, f Arrangement of measurement points: A 4.3. Rys. Fig.

Dla przykładu, na rysunku 4.3 pokazano rozmieszczenie punktów pomiarowych wewnątrz płomieni nr 7 i 12 leżących na poziomej płaszczyźnie przekroju komory spalania przechodzącej przez oś palnika. Na rysunku tym pokazano także rozmieszczenie punktów pomiaru temperatury gazów spalinowych w całym obszarze komory spalania.

Wykonywanie pomiarów w początkowej części płomienia w pobliżu wylotu z palnika było często kłopotliwe ze względu na pokrywanie końcówki termopary sadzą. Konieczność usuwania tej sadzy i oczyszczania końcówki termopary wydłużała czas trwania pomiarów i wprowadzała dodatkowe błędy pomiarowe. Jednak zjawisko to występowało w stosunkowo małym obszarze płomienia i dlatego wpływ tych wyników pomiarów na obliczaną wartość średniej temperatury płomienia był niewielki.



Rys. 4.4. Rozmieszczenie punktów pomiaru temperatury na wewnętrznej powierzchni ścian komory Fig. 4.4. Location of points of temperature measurements on internal surface of wall of combustion chamber

Na rysunku 4.4 pokazano rozmieszczenie punktów pomiaru temperatury wewnętrznej powierzchni ścian komory. Punkty pomiarowe od 1 do 6 usytuowane są na ścianie bocznej wzdłuż linii leżącej 10 cm poniżej głównej szczeliny pomiarowej. Punkty 7 i 8 oraz 9 i 10 usytuowane są odpowiednio na tylnej i przedniej ścianie komory, przy czym punkty 7 i 9 w górnej części, a 8 i 10 w dolnej części tych ścian.

#### 4.2.2. Pomiar koncentracji sadzy

Pomiary koncentracji sadzy przeprowadzono dla płomieni 1-12. Mierzono lokalne wartości koncentracji sadzy wewnątrz płomieni, a pomiary wykonywano w tych samych punktach pomiarowych, w których mierzono temperaturę płomienia. Rozmieszczenie tych punktów dla płomieni nr 7 i 12 pokazano na rysunku 4.3.

W przypadku dwóch płomieni, nr 1 i 2, zmierzono także koncentrację sadzy w spalinach opuszczających komorę spalania. W pozostałych badanych przypadkach sadza ulegała całkowitemu wypaleniu wewnątrz obszaru płomieni. Pomiar koncentracji sadzy wewnątrz obszaru płomienia nastręczył wiele problemów i dopracowanie odpowiedniej technologii tego pomiaru wymagało odrębnych badań.

Pomiary prowadzono za pomocą specjalnej sondy, do poboru stałych cząstek z obszaru spalania, zakupionej w IFRF Ijmuiden. Sonda ta jest standardowo wyposażona w filtry do wychwytywania cząstek stałych, które są wykonane ze spieczonych granulek brązu [32]. Filtry mają kształt ściętego stożka o średnicy podstawy 14 mm, średnicy powierzchni ścięcia 10 mm i wysokości 105 mm. Zarówno rozmiary filtrów, jak i materiał, z którego je wykonano, były nieodpowiednie dla potrzeb niniejszych badań. Filtry o tych rozmiarach mają masę około 50 g, co w porównaniu do masy wychwyconej przez nie sadzy, zwłaszcza w przypadku punktów pomiarowych o niższej koncentracji sadzy, jest wielkością o kilka rzędów wyższą i przez to znacznie utrudniającą dokładne wyznaczenie masy tej próbki sadzy. Dla zwiększenia dokładności pomiaru masy porcji sadzy wychwyconej przez filtr zaprojektowano filtry o innym kształcie i rozmiarach, jednak takich, aby mogły być zastosowane we wspomnianej sondzie. Zastosowano więc filtry w kształcie cylindra o średnicy 10 mm i wysokości 21 mm. Zmniejszono w ten sposób masę filtra około 6-krotnie.

Po przeprowadzeniu pomiarów w szeregu punktach w kilku płomieniach okazało się jednak, że przyrosty masy filtrów, które powinny być proporcjonalne do ilości wychwyconej sadzy, wykazują w pewnych przypadkach brak takiego związku. Przeprowadzone dodatkowe badania wykazały, że wykonane z brązu filtry reagują chemicznie w wysokich temperaturach występujących w płomieniu, ulegając bądź utlenianiu, bądź redukcji. Wykonane wcześniej pomiary zawartości sadzy okazały się bezużyteczne. Po tych obserwacjach przeprowadzono konsultację z holenderskim wytwórcą zakupionej sondy, w wyniku której okazało się, że filtry z brązu mogą być stosowane do pomiaru zawartości sadzy w spalinach poza obszarem płomienia, gdzie poziom temperatury jest niższy i reakcja materiału filtra z przepływającymi przezeń gazami jest na tyle mała, że jej skutki można pominąć.

Zaistniała zatem konieczność znalezienia innego materiału, z którego wykonany filtr byłby odpowiedni do pomiarów w obrębie płomienia. Wymagania, jakie taki materiał powinien spełniać, są jednak wyjątkowo wysokie, gdyż obejmują zarówno dużą wytrzymałość mechaniczną, jak i odpowiednią odporność chemiczną na oddziaływanie wysokotemperaturowych spalin.

Wysoka wytrzymałość mechaniczna filtra jest konieczna, gdyż wewnątrz sondy filtr musi być mocno dociśnięty, aby w trakcie poboru próbki spalin uniknąć nieszczelności i omijania filtra przez część zasysanego strumienia spalin. To wymaganie wytrzymałości mechanicznej eliminuje z rozważań substancje ceramiczne, które są z reguły obojętne chemicznie, ale wykruszają się przy docisku mechanicznym.

Po przeanalizowaniu dostępności materiałów i możliwości technicznych wykonania filtrów zdecydowano się na filtry ze stali nierdzewnej. Poprzedzone to zostało odpowiednimi testami laboratoryjnymi, w których zbadano podatność materiału filtra na reagowanie z otaczającym gazem w zależności od wysokości temperatury i okresu przebywania filtra w tej temperaturze. Przebadano w ten sposób filtry wykonane z granulek dwóch rodzajów stali nierdzewnej o oznaczeniach 316L i 904L oraz dla porównania z granulek brązu o oznaczeniu B10 [99].

Badania wykazały, że obydwa badane gatunki stali nierdzewnej zachowują się podobnie i są wielokrotnie bardziej odporne na utlenianie niż brąz. Na rysunku 4.5 zaprezentowano przykładowe wyniki przeprowadzonych badań. Widać tu, jaki jest wpływ temperatury, w której przez okres 10 minut przetrzymywane były filtry wykonane z trzech badanych materiałów, na procentowy przyrost masy filtra. Przyrost masy filtrów ze stali nierdzewnej jest kilkunastokrotnie mniejszy niż filtrów z brązu.



- Rys. 4.5. Przyrost masy filtra w wyniku 10-minutowego oddziaływania powietrza o różnej temperaturze w zależności od materiału filtra: ● brąz B10, ◆ stal nierdzewna 316L, ▲ stal nierdzewna 904L
- Fig. 4.5. Growth of mass of filter being exposed, for 10-minutes period, on air as a function of air temperature filter substance: bronze B10, ◆ stainless steel 316L, ▲ stainless steel 904L

Do pomiarów koncentracji sadzy w płomieniach zdecydowano się używać filtrów ze stali nierdzewnej 316 L, które co prawda w porównaniu do filtrów ze stali 904 L były nieznacznie bardziej reaktywne, ale łatwiejsze w wykonaniu, mniej kruche i nieco tańsze.

Wszystkie filtry wykonane były w Instytucie Metali Nieżelaznych w Gliwicach, a ich porowatą strukturę uzyskiwano przez odpowiednie sprasowanie granulek ze stali. Stal nierdzewna o symbolu 316 L posiada następujący skład elementarny: Fe-67.5%, Cr-18.0%, Ni-12.0%, Mo-2.5 %.

### 4.2.3. Pomiar opromieniowania ścian komory spalania

Pomiar gęstości opromieniowania ścian komory prowadzono za pomocą elipsoidalnego radiometru całkowitego promieniowania produkcji IFRF Ijmuiden. Chłodzony uchwyt radiometru przymocowany był do urządzenia przesuwnego i wsunięty do szczeliny pomiarowej w ten sposób, aby oś czujnika radiometru leżała w płaszczyźnie przechodzącej przez oś palnika i była prostopadła do tej osi, natomiast powierzchnia pomiarowa czujnika pokrywała się z płaszczyzną wewnętrznej powierzchni ściany komory spalania. Pomiary wykonywano w 9 punktach rozmieszczonych wzdłuż osi palnika, jak pokazano na rysunku 4.6. W czasie pomiarów, zgodnie z instrukcją obsługi przyrządu, do komory czujnika doprowadzano kontrolowany strumień azotu dla ochrony jego powierzchni pomiarowej przed zanieczyszczeniami.

#### 4.2.4. Wyznaczanie rozmiarów płomienia

W niniejszych badaniach płomieniem nazywana jest ta część obszaru spalania, która wyraźnie świeci i jest widzialna. Przy określaniu zewnętrznych rozmiarów bryły płomienia przyjęto, że jest to bryła osiowo symetryczna o zmieniającej się średnicy. Dla wyznaczenia jej rozmiarów płomień podzielono poprzecznie na cylindryczne elementy (plastry) i mierzono



Rys. 4.6. Rozmieszczenie punktów pomiaru gęstości opromieniowania ścian komory Fig. 4.6. Location of measurement points of irradiation power of combustion chamber wall

ich średnice i długości. Pomiary te prowadzono w trakcie pomiarów temperatury płomienia za pomocą termopary odciągowej. Najbardziej oddalone od osi punkty pomiaru temperatury, w danym przekroju poprzecznym płomienia, leżały na brzegu płomienia. Lokalizacja tego położenia termopary wyznaczała średnicę danego elementu płomienia.

Położenie ostatniego punktu pomiaru w osi płomienia określało długość płomienia. Zewnętrzną powierzchnię płomienia obliczano jako sumę powierzchni pobocznic elementów podziałowych oraz kołowej powierzchni końcowej.

#### 4.2.5. Pomiar średnic kropel

Pomiary średnic kropel rozpylonego paliwa przeprowadzono poza komorą spalania nie podpalając rozpylonej strugi. Pomiary te zaplanowano przeprowadzić za pomocą analizatora widma kropel typu AWK produkcji Zakładu Elektronicznej Aparatury Pomiarowej w Warszawie.

Wstępne pomiary przeprowadzone przy użyciu analizatora wykazały jednak jego ograniczoną przydatność dla potrzeb niniejszej pracy. Zakres pomiarowy analizatora rozpoczyna się bowiem od rozmiaru 20 µm, co oznacza, że zarejestrowanym przez sondę pomiarową analizatora kroplom o średnicy mniejszej od 20 µm przypisywany jest rozmiar 20 µm. Jeżeli liczba takich kropel, w stosunku do wszystkich zliczonych, jest niewielka, to nie ma to istotnego wpływu na wartość średniej średnicy. Tymczasem w większości przypadków analizowanych wariantów rozpylania występowała duża liczba kropel o średnicach mniejszych od 20 µm, co już istotnie wypaczało wartości otrzymywanych rezultatów pomiarów. Należało zatem zastosować inną metodę pomiarową.

Zastosowano metodę wyłapywania kropel na warstwę sadzy naniesioną na szklaną płytkę i zliczania ich pod mikroskopem. Jest to metoda bardzo czasochłonna, ale jednak dość często stosowana [57].

Średnicę Sautera wyznaczano na podstawie zliczenia łącznie około 1500 kropel z dziewięciu próbek pobieranych z punktów leżących na płaszczyźnie prostopadłej do osi rozpylacza i przecinającej rozpyloną strugę w odległości 6 cm od wylotu rozpylacza. Dziewięć pokrytych sadzą płytek szklanych, każda o wymiarach 15 x 15 mm, rozstawiano na płaszczyźnie wzdłuż dwóch linii przecinających się pod kątem prostym w ten sposób, że tworzyły symetryczny krzyż wewnątrz okręgu o średnicy 80 mm. Wyłapywanie kropel następowało poprzez chwilową ekspozycję płaszczyzny z płytkami na strugę rozpylonego paliwa.

#### 4.3. Wyniki pomiarów

#### 4.3.1. Wyniki szczegółowe wybranej serii płomieni

Jak wcześniej wspomniano, przebadano 26 płomieni olejowych, których parametry prowadzonego procesu zestawiono w tablicy 4.2. Dla każdego badanego wariantu płomienia wykonano szereg pomiarów różnych parametrów samego płomienia i komory spalania. Ze względu na dużą liczbę wyników pomiarowych, szczegółowo zaprezentowane zostana wyniki tylko jednej z serii przebadanych płomieni (seria 2., płomienie 7-12).

W zestawieniu 4.1 zawarto rezultaty pomiarów temperatury, a w zestawieniu 4.2 pomiarów koncentracji sadzy w tych płomieniach wraz z rozmieszczeniem punktów pomiarowych. Najbardziej oddalone od osi punkty pomiarowe leżą na brzegu każdego z płomieni.

W zestawieniu 4.3 zebrano z kolei, także pokazując rozmieszczenie punktów pomiarowych, wyniki pomiarów temperatury we wnętrzu komory spalania.

W tablicy 4.3 podano wyniki pozostałych szczegółowych pomiarów dla płomieni 7-12. Są to wyniki pomiarów temperatury i gęstości opromieniowania powierzchni ścian komory.

Należy tu przypomnieć, że rozmieszczenie punktów, w których dokonywano pomiarów temperatury na wewnętrznej powierzchni ścian, jest inne niż punktów, w których mierzono gęstość opromieniowania. W tablicy 4.3, dla uproszczenia zapisu, przyjęto wspólna numerację dla punktów pomiarowych obu tych wielkości, nie należy jednak ulegać sugestii, że położenie tych punktów jest wspólne.

Tablica 4.3

PLOMIEN NR 9

PLOMIEN NR 8

-

Punkt	Plon	nień 7	Pion	nień 8	Pion	nień 9	Plon	nień 10	Płom	ień 11	Plon	nień 12
pom.	Temp.	Oprom.										
-	ścian	ścian										
Nr	K	kW/m <sup>2</sup>										
1	1118	105.95	1092	97.64	1072	90.50	1061	88.24	1052	85.28	1048	80.43
2	1131	108.01	1112	99.20	1091	92.60	1087	89.64	1077	87.09	1072	82.56
3	1137	108.32	1117	100.03	1096	93.82	1093	90.52	1085	87.30	1080	84.27
4	1143	106.65	1120	99.05	1106	94.01	1102	90.53	1094	88.31	1089	85.97
5	1147	104.46	1125	97.44	1119	93.50	1113	90.94	1107	88.00	1102	87.15
6	1136	102.97	1112	96.45	1104	92.96	1097	90.82	1094	88.42	1090	88.62
7	1168	101.56	1149	95.45	1137	92.39	1130	90.76	1126	89.41	1121	89.21
8	1161	99.85	1146	93.76	1132	91.76	1126	90.57	1122	90.03	1116	90.27
9	1126	98.71	1108	92.67	1097	91.29	1087	90.47	1080	91.08	1074	91.08
10	1120		1103		1092		1982		1076		1071	

Wyniki pomiarów parametrów na wewnętrznej powierzchni ścian komory spalania

(K) zmierzone wewnątrz płomieni 7-12 e (K) inside the flames 7-12 temperature Wartości temperatury of Zestawienie 4.1. Wartości Specification 4.1. Values

1677

1637

1643

1649

PLUMIEN NR 7	F	PŁOMIEŃ NR 8	PLOMI	EŃ NR 9
0.00 0.01 0.09 0.18 0.26 0.37 0.4	0.00 0.02 0.08 0.0445 m	0.14 0.20 0.27 0.34 0.385 m	0.00 0.03 0.07 0.13	0.17 0.23 0.29 0.32 m
0.00 13073 11683 9861 4562 2886 43	6 72 oś płom. 0.00 7567 6480	4088 2246 1179 431 83	0.00 4876 3394 2437	1655 854 412 47
0.02 12992 11945 7883 4272 2671 31	9 0.02 7288 5808	3560 2058 1065 316	0.02 4429 2973 1910	1412 814 384
0.04 9183 7374 5514 3692 1724 18	0.04 <b>3801 3149</b>	2095 1187 917 281	0.04 1954 1654 1031	784 621 350
0.06 3332 3846 4330 3034 862	0.06 1423 1636	1040 733 458 230	0.06 94 905 797	433 332 58
0.08 <b>160 2384 1361 1186</b> 23 0.09 212 87 89	3 0.08 123 0.087 m	68 33	0.07 <b>102</b> 0.075 m <b>76</b>	83 19
0.10 m 52	0.087 m	83 /9		
PŁOMIEŃ NR 10	PŁ	OMIEŃ NR 11	PŁOMIEŃ	NR 12
0.00 0.02 0.06 0.12 0.16 0.22 0.26 0.	.29 m 0.00 0.02 0.06 0	.12 0.18 0.24 0.27 m	0.00 0.02 0.06 0.12 (	0.17 0.23 0.26 m
0.00 3373 2384 1712 1142 677 320 0	62 0.00 2457 1722 1.	388 694 382 58	0.00 1711 1239 1002	704 357 38
0.02 3188 2261 1632 1081 667 247	0.02 2285 1573 1	276 688 332	0.02 1651 1140 906	599 273
0.04 1463 1262 864 549 479 230 0.055 28	0.04 1257 974	845 574 129	0.04 934 718 816	256 29
0.06 134 74 0.065 m 48 42 51	0.06 84 0.065 m	31 27	0.055 m <b>38</b> 72	0.3

Zestawienie 4.2. Wartości koncentracji sadzy  $(mg/m^3)$  zmierzone wewnątrz płomieni 7-12 Specification 4.2. Values of soot concentration  $(mg/m^3)$  inside the flames 7-12

			PŁO	MIEŃ '	7							PLON	1IEŃ 8				
0.000	0.08	0.22	0.38	0.52	0.68	0.82	0.98	1.05 m	0.000	0.06	0.20	0.32	0.46	0.64	0.78	0.96 1.05	5 m
0.00				1254	1181	1124	1090		0.00				1425	1279	1165	1120	
0.05									0.05								
0.10				1245	1176	1115	1086		0.10				1321	1235	1148	1117	
0.15	1218	1257	1278	1231	1165	1107	1085		0.15	1209	1255	1287	1251	1191	1131	1115	
0.20	1193	1231	1251	1211	1152	1098	1083		0.20	1184	1224	1260	1221	1174	1127	1110	
0.25	1174	1208	1210	1165	1139	1092	1082		0.25	1167	1195	1219	1180	1157	1122	1104	
0.30 m	1152	1167	1179	1147	1108	1084	1079		0.30 m	1145	1164	1173	1156	1130	1118	1100	
			PŁO	MIEŃ 9								PŁOM	IIEŃ 10				
0.000	0.08	0.24	0.40	0.52	0.68	0.82	0.98	1.05 m	0.000	0.08	0.22	0.38	0.52	0.68	0.82	0.98 1.0	5 m
0.00			1502	1435	1288	1182	1136		0.00			1577	1441	1295	1198	1146	
0.05									0.05								
0.10			1342	1326	1250	1165	1130		0.10	1195	1284	1353	1334	1260	1178	1137	
0.15	1200	1253	1292	1258	1202	1148	1126		0.15	1194	1252	1298	1262	1210	1160	1132	
0.20	1177	1215	1266	1223	1180	1141	1118		0.20	1173	1208	1268	1225	1182	1149	1123	
0.25	1161	1184	1224	1186	1166	1133	1114		0.25	1157	1171	1225	1188	1169	1140	1120	
0.30 m	1142	1159	1169	1162	1143	1127	1110		0.30 m	1140	1156	1166	1166	1152	1132	1116	
			PŁC	MIEŃ	11							PLON	HEŃ 12				
0.000	0.07	0.19	0.35	0.49	0.65	0.81	0.97	1.05 m	0.000	0.07	0.19	0.33	0.49	0.65	0.81	0.97 1.05	m
0.00			1622	1484	1308	1218	1154		0.00			1678	1545	1318	1227	1162	
0.05									0.05								
0.10	1196	1282	1378	1356	1279	1191	1142		0.10	1191	1279	1416	1371	1288	1197	1159	
0.15	1190	1250	1300	1274	1218	1170	1137		0.15	1187	1250	1299	1277	1223	1175	1143	
0.20	1171	1207	1270	1225	1187	1156	1130		0.20	1169	1205	1271	1226	1191	1161	1134	
0.25	1155	1167	1227	1190	1174	1148	1124		0.25	1152	1167	1229	1191	1177	1153	1128	
0.30 m	1138	1154	1164	1168	1158	1141	1121		0.30 m	1137	1152	1162	1167	1163	1146	1125	

Zestawienie 4.3. Wartości temperatury (K) zmierzone wewnątrz komory spalania dla przypadków płomieni 7-12 Specification 4.3. Values of temperature (K) inside combustion chamber for cases of the flames 7-12

53

52

W tablicy 4.3 nie zamieszczano wyników pomiarów tych parametrów, które były mierzone w jednym punkcie pomiarowym, jak np. temperatura spalin na wylocie komory spalania. Rezultaty tych pomiarów zestawione są w tablicach, w których zamieszczono wyniki uśrednione.

#### 4.3.2. Wyniki uśrednione zmierzonych parametrów

Na podstawie wykonanych pomiarów, zaprezentowanych w rozdziale 4.3.1 na przykładzie serii płomieni 7-12, wyznaczono uśrednione wartości parametrów wszystkich badanych płomieni.

Przy wyznaczaniu średnich wartości parametrów płomienia zakładano jego osiową symetrię, natomiast przy wyznaczaniu średnich wartości parametrów dotyczących ścian komory przyjmowano jednakowe wartości tych parametrów w przekrojach poprzecznych komory. Wyznaczone średnie są średnimi ważonymi.

Przy obliczaniu średnich wartości temperatury i gęstości opromieniowania wewnętrznej powierzchni ścian komory wagami były udziały powierzchni elementów różnicowych w całkowitej powierzchni ścian. Z kolei wagami przy wyznaczaniu średnich wartości: temperatury płomienia, koncentracji sadzy w płomieniu oraz temperatury gazów spalinowych w komorze spalania poza płomieniem były udziały objętościowe elementów podziału różnicowego analizowanego obszaru wynikającego z rozmieszczenia punktów pomiarowych danego parametru.

Šrednie wartości temperatury płomienia oraz spalin w komorze i ścian komory zostały obliczone według zależności

$$T_{irr} = \sqrt[4]{\sum_{i=1}^{n} a_i T_i^4} , \qquad (4.1)$$

gdzie: ai - odpowiednie wagi, a Ti - wartości temperatury zmierzone w i-tym elemencie.

Taki sposób obliczania średniej temperatury został przyjęty z powodu wykorzystywania wyznaczonych wartości w obliczeniach promienistej wymiany ciepła w komorze spalania prezentowanych w dalszej części pracy. Strumień energii promienistej jest proporcjonalny do czwartej potęgi temperatury bezwzględnej danego ciała. Zatem aby zastępczy strumień ciepła emitowanego przez obiekt o wyrównanej, uśrednionej temperaturze był równy sumie strumieni emitowanych przez poszczególne elementy tego obiektu posiadające różną temperaturę, należy tę uśrednioną temperaturę obliczyć w wyżej podany sposób.

Zewnętrzną powierzchnię płomienia wyznaczano w sposób omówiony w rozdziale 4.2.4. Bryłę płomienia podzielono poprzecznie na cylindryczne elementy o różnych średnicach i długościach, których rozmiary określano podczas pomiaru temperatury.

Powierzchnię płomienia obliczano za pomocą zależności

$$F_{f} = \pi \left( \sum_{i=1}^{n} 2r_{i} \Delta x_{i} + r_{k}^{2} \right), \qquad (4.2)$$

gdzie: r<sub>i</sub>, r<sub>k</sub> - promień i-tego elementu cylindrycznego oraz kołowej powierzchni końcowej danego płomienia, a ∆x<sub>i</sub> długość i-tego elementu.

Na przykład, dla płomienia 9 liczba elementów podziału poprzecznego płomienia n=6, natomiast wartości promieni  $r_i$  i  $r_k$  oraz długości  $\Delta x_i$  są równe odpowiednio:

$r_1 = 0.065 m,$	$\Delta x_1 = 0.05 \text{ m},$
$r_2 = 0.070 \text{ m},$	$\Delta x_2 = 0.05 \text{ m},$
$r_3 = 0.074 \text{ m},$	$\Delta x_3 = 0.05 \text{ m},$
$r_4 = 0.075 m$ ,	$\Delta x_4 = 0.05 \text{ m},$
$r_5 = 0.070 m$ ,	$\Delta \mathbf{x}_5 = 0.06 \ \mathrm{m},$
$r_6 = 0.065 m$ ,	$\Delta x_6 = 0.06 \text{ m},$
$r_k = 0.060 \text{ m}.$	

Całkowita długość płomienia wynosi  $l_f = \sum \Delta x_i = 0.32$  m, a powierzchnia zewnętrzna wyliczona według wzoru (4.2) wynosi  $F_f = 0.1514$  m<sup>2</sup>.

W tablicach 4.4-4.7 zestawiono rezultaty obliczeń uśrednionych parametrów dla czterech badanych serii płomieni.

Dla drugiej, trzeciej i czwartej serii pomiarowej nie podano w tabelach rezultatów pomiarów udziałów głównych składników spalin na wylocie z komory spalania. Pomiary te nie wykazywały bowiem istotnych różnic, które byłyby charakterystyczne dla poszczególnych wariantów płomieni. Były to raczej wahania wokół wartości średniej. Można zatem przyjąć, że skład spalin opuszczających komorę był we wszystkich tych przypadkach płomieni jednakowy, a udziały objętościowe składników spalin suchych wynosiły:  $O_2 = 3.7\%$ ,  $CO_2 = 12.8\%$ ,  $N_2 = 83.5\%$ .

Podane w tablicach 4.4, 4.5 i 4.7 wartości udziałów objętościowych NO w spalinach suchych na wylocie z komory są wartościami przeliczonymi na 3% udział tlenu.

#### 4.4. Bledy pomiarowe

4.4.1. Parametry substratów spalania

#### Stosunek nadmiaru powietrza

Wartość stosunku nadmiaru powietrza wyliczana jest z zależności:

$$\lambda = \frac{\dot{V}_{aw} + \dot{V}_{ar}}{\dot{P}V_{a\min}},$$
(4.3)

gdzie: V<sub>a min</sub>, V<sub>aw</sub>, V<sub>ar</sub> - odpowiednio: minimalne zapotrzebowanie oraz rzeczywisty strumień powietrza wentylatorowego i rozpylającego, natomiast P - strumień spalanego paliwa.

Błąd (niedokładność bezwzględną, złożoną niepewność standardową) Δλ wyznaczenia stosunku nadmiaru powietrza można oszacować na podstawie prawa propagacji błędów [21, 77, 95]. Dla równania (4.3) otrzymuje się wówczas:

$$\Delta\lambda = \left[ \left( \frac{\Delta \dot{V}_{aw}}{\dot{P}V_{a\min}} \right)^2 + \left( \frac{\Delta \dot{V}_{ar}}{\dot{P}V_{a\min}} \right)^2 + \left( \frac{\Delta \dot{P}(\dot{V}_{aw} + \dot{V}_{ar})}{\dot{P}^2 V_{a\min}} \right)^2 + \left( \frac{\Delta \dot{V}_{a\min}(\dot{V}_{aw} + \dot{V}_{ar})}{\dot{P}V_{a\min}^2} \right)^2 \right]^{0.5}.$$
 (4.4)

Tablica 4.4

	-		_			_			-		_
	Zaw.	[ON]	w spal.		mdd	41	58	74	106	127	134
narowej	alin			$N_2$	%	83.7	84.1	83.6	83.2	83.0	82.6
erii pon	ych sp	wych		02	%	0.5	1.4	3.2	5.0	5.8	7.3
eni 1-ej so	ład such	wyloto		co	mdd	1930	42	1	1	1	
w płomie	Sk			CO <sub>2</sub>	%	15.6	14.5	13.1	11.8	11.2	10.1
parametró	Konc.	sadzy w	spal.		mg/m <sup>3</sup>	1082	625			1	
wartości	Temp.	na wyl.	kom.		K	1098	1102	1106	1110	1112	1094
dnionych	Temp.	spalin	w kom.		K	1155	1158	1165	1173	1180	1173
iczeń uśre	Gęst.	oprom.	śc.kom.		kW/m <sup>2</sup>	109.72	107.53	96.70	68.16	86.91	82.98
rów i obl	Temp.	ścian	kom.		K	1151	1145	1117	1102	1088	1076
ki pomia	Konc.	sadzy	płom.		mg/m <sup>3</sup>	3173	2450	1289	1228	1071	1024
Wyni	Temp.	-ołq	mienia		K	1389	1423	1508	1668	1759	1795
	Pow.	pło-	mienia		m²	0.4559	0.3694	0.2061	0.1055	0.0648	0.0487
	-ofq	mień		1	Nr	1	2	e	4	5	9

Tablica 4.5

Wyniki pomiarów i obliczeń uśrednionych wartości parametrów płomieni drugiej serii nomiarowej

				Politicato				
Pło- mień	Pow. płom.	Temp. płom.	Konc. sadzy w płom.	Temp. ścian komory	Gęstość oprom. ścian kom.	Temp. spalin w kom.	Temp. na wyl. kom.	Zaw. [NO] w spal.
Nr	$m^2$	K	mg/m <sup>3</sup>	K	kW/m <sup>2</sup>	K	K	ppm
7	0.2731	1428	2705	1137	103.98	1155	1085	69
8	0.2061	1525	1190	1116	96.82	1164	1107	75
9	0.1514	1618	873	1103	92.58	1172	1122	81
10	0.1206	1681	711	1096	90.32	1176	1131	85
11	0.1063	1710	641	1090	88.39	1180	1138	89
12	0.0895	1752	562	1085	86.78	1184	1145	92

Tablica 4.6

Wyniki pomiarów i obliczeń uśrednionych wartości parametrów płomieni trzeciej serii pomiarowej

Płomień	Pow.	Temp.	Temp.	Gęst. opr.	Temp.	Temp.
	płomienia	płomienia	wewn. pow.	wewn. pow.	spalin	spalin na
			ścian kom.	ścian kom.	w komorze	wyl. kom.
(2.4)	2	1-14				
Nr	m	K	K	kW/m²	K	
13	0.1244	1412	615	18.89	896	749
14	0.1440	1430	782	31.50	956	861
15	0.1627	1466	908	48.15	1017	946
16	0.1779	1485	987	62.94	1061	995
17	0.1935	1498	1036	74.35	1105	1044
18	0.1985	1515	1076	85.78	1131	1071
19	0.2011	1521	1105	93.44	1154	1093
20	0.2036	1523	1113	95.89	1161	1100

56

Tablica 4.7

Wyniki pomiarów i obliczeń uśrednionych wartości parametrów płomieni czwartej serij

			pomiar	owej	-E		
Pło- mień	Pow. płomienia	Temp. płomienia	Temp. wew. pow. ścian kom.	Gęst.opr. ścian komory	Temp. spalin w kom.	Temp. spalin na wyl. kom.	Zaw. [NO] w spal.
Nr	$m^2$	K	K	kW/m <sup>2</sup>	K	K	ppm
21	0.3016	1319	1008	67.46	1037	951	53
22	0.2111	1471	984	61.63	1045	972	62
23	0.1561	1560	973	59.08	1053	987	70
24	0.1199	1639	965	57.28	1058	997	77
25	0.1063	1668	956	55.33	1063	1005	80
26	0.0927	1704	949	53.81	1067	1010	82

Występujące we wzorze (4.4) błędy  $\Delta P$  oraz  $\Delta V_{a \min}$  określa się również za pomocą prawa przenoszenia błędów wykorzystując zależności używane do ich wyznaczenia:

$$P = \frac{\pi h \rho_p d_z}{4\tau}, \qquad (4.5)$$

$$V_{a\min} = \frac{\frac{s}{32} + \frac{c}{12} + \frac{h}{4} - \frac{o}{31}}{0.21} \times (Mv), \qquad (4.6)$$

gdzie: h jest zmianą poziomu paliwa o gęstości  $\rho_p$  jaka nastąpiła w czasie  $\tau$  w zbiorniku o średnicy d<sub>z</sub>; s, c, h, o są gramowymi udziałami siarki, węgla, wodoru i tlenu w spalanym paliwie a (Mv) jest molową objętością właściwą powietrza przy parametrach stosowanych w czasie badań. Parametry te miały stałą wartość: temperatura 20°C i ciśnienie 0.104 MPa.

Błąd ΔV<sub>aw</sub> strumienia powietrza wentylatorowego wyznaczono zgodnie z normą
 PN-93/M-53950/01 dotyczącą pomiarów strumieni płynów za pomocą zwężek pomiarowych.
 Błąd ΔV<sub>ar</sub> strumienia powietrza rozpylającego wyznaczono za pomocą prawa
 przenoszenia błędów zastosowanego do wykorzystywanej zależności przeliczeniowej:

$$\dot{V}_{ar} = \dot{V}_{rot} \frac{p_n T_w}{p_w T_n} \left( \frac{p_x T_r}{p_r T_x} \right)^{0.5}.$$
(4.7)

Strumień  $\dot{V}_{ar}$  zmierzono za pomocą rotametru o klasie dokładności 1.5 i zakresie pomiarowym 0.50-3.00 m<sub>n</sub><sup>3</sup>/godz, wyskalowanego dla powietrza o parametrach 17°C i 0.30 MPa. Wielkość  $\dot{V}_{rot}$  we wzorze (4.7) oznacza strumień odczytany ze skali rotametru, który należy skorygować ze względu na różnicę pomiędzy parametrami znamionowymi rotametru i rzeczywistymi, panującymi w czasie pomiaru. Indeksy we wzorze (4.7) oznaczają: n - warunki normalne 0°C, 0.101 MPa,

r - warunki znamionowe rotametru 17°C, 0.30 MPa,

x - warunki rzeczywiste w rotametrze w czasie pomiaru,

w - warunki powierza wentylatorowego 20°C, 0.104 MPa.

Stosunek nadmiaru powietrza zmieniany był w pierwszej serii płomieni, natomiast w pozostałych przypadkach miał stałą wartość. W tablicy 4.8 zamieszczono wartości błędu  $\Delta\lambda$  obliczonego za pomocą wzoru (4.4) oraz błędu  $\Delta V_{aw}$  dla płomieni pierwszej serii (1-6) oraz płomienia 8, przykładowo wybranego z pozostałych badanych wariantów. Dla tych płomieni parametry  $\dot{V}_{av}$ ,  $\dot{P}$  i  $V_{a \min}$  były stałe. Ich wartość oraz błędy, oszacowane w wyżej wyjaśniony sposób, w oparciu o dokładność odczytu mierzonych wielkości i klasę użytych przyrządów, wynoszą:

Tablica 4.8

Płomień	Strumień powietrza wentylatorowego	Błąd	Stosunek nadmiaru powietrza	Błąd
Nr	$v_{aw}$ $m^3/h$	$\Delta \tilde{V}_{aw}$ $m^3/h$	λ	Δλ
1	44.0	0.4	0.96	0.02
2	48.7	0.4	1.06	0.02
3	53.8	0.5	1.17	0.03
4	59.3	0.5	1.29	0.03
5	62.5	0.6	1.36	0.03
6	69.0	0.6	1.50	0.03
8	55.2	0.5	1.20	0.03

$\dot{V}_{ar} = 0.29 \text{ m}^3/\text{h}$	-	$\Delta \dot{V}_{ar} = 0.05 \text{m}^3/\text{h},$
P = 3.80  kg/h	-	$\Delta P = 0.07 \text{ kg/h},$
$V_{a min} = 12.15 m^3/kg$	-	$\Delta V_{a \min} = 0.07 \text{ m}^3/\text{kg}$

#### Średnica Sautera

Błąd wyznaczenia średniej średnicy Sautera zbioru kropel otrzymanych po rozpyleniu paliwa jest trudny do oszacowania, gdyż składają się na niego: błąd samej metody pomiarowej, błędy zastosowanych przyrządów pomiarowych oraz błąd wynikający z reprezentatywności analizowanej próbki.

W literaturze nie można znaleźć wyczerpujących danych odnośnie do oceny dokładności licznych istniejących metod pomiaru średnic kropel. Nie ma też wyników badań porównawczych istniejących metod. Zatem błąd metody, który wydaje się mieć zasadnicze znaczenie, jest nieznany. Autor ocenia, że w przypadku zastosowanej metody wyłapywania na sadzę może on być rzędu kilkunastu %.

Stosunkowo łatwo jest określić błąd przyrządów pomiarowych, który z reguły nie przekracza kilku %.

I wreszcie błąd wynikający z reprezentatywności próbki jest również trudny do oszacowania, gdyż wpływa na niego zarówno liczebność próbki, jak i sposób jej pobrania zapewniający reprezentatywność. Z informacji podanych w [57] wynika, że przy liczebności analizowanej próbki rzędu 1500 kropel dokładność wyznaczania średnicy Sautera, w obszarze pewności 95%, wynosi około 10%. Natomiast wobec braku obiektywnych wskazań odnośnie do sposobu poboru próbki, przy różnych typach i rozmiarach rozpylaczy, duży wpływ na wartość błędu, jaki tu można popełnić, ma doświadczenie prowadzącego pomiar.

Reasumując, można ocenić, że przy zastosowanej metodzie i sposobie pomiaru błąd wyznaczenia średnicy Sautera może być rzędu 20%.

#### 4.4.2. Parametry w komorze spalania

#### Temperatura ścian komory

Pomiar temperatury ścian prowadzono za pomocą termopary płaszczowej NiCr-Ni podłączonej do multimetru cyfrowego, którego dokładność pomiaru wynosi  $\pm$  0.01% wartości maksymalnej podzakresu. Odczytów dokonywano na podzakresie 100 mV o rozdzielczości 0.01 mV. Termoelement NiCr-Ni ma niemal stałą charakterystykę termometryczną, w której 1 mV odpowiada 25 K. Błąd pomiaru wynosi zatem

#### $\Delta T_{\rm w} = (0.0001 \times 100 + 0.01) \times 25 = 0.5 \text{ K}.$

#### Temperatura plomienia

Pomiar temperatury w płomieniu prowadzono za pomocą termopary PtRh-Pt oraz miernika o zakresie 1600°C, którego dokładność wynosi 0.15% wartości maksymalnej, natomiast rozdzielczość odczytu 1 K. Zatem błąd pomiaru wynosi:

#### $\Delta T_{\rm f} = 0.0015 \times 1600 + 1 = 3.4 \, {\rm K}.$

#### **Opromieniowanie** ścian

Gęstość opromieniowania mierzono przy użyciu radiometru całkowitego promieniowania, którego dokładność pomiaru jest rzędu 3% wartości padającego strumienia ciepła. Odczytu dokonywano na multimetrze cyfrowym o dokładności pomiaru  $\pm$  0.01% maksymalnej wartości podzakresu. W pomiarach stosowano zakres 10 mV o rozdzielczości odczytu 0.001 mV. Czujnik radiometru posiada liniową charakterystykę, w której 1 mV odpowiada strumień ciepła równy 64 kW/m<sup>2</sup>. Błąd pomiaru wynosi zatem:

 $\Delta g_{w} = 0.03g_{w} + (0.0001 \times 10 + 0.001) \times 64 = (0.03g_{w} + 0.128) \text{ kW/m}^{2}.$ 

#### 4.5. Analiza wyników pomiarów

Przeprowadzone badania dostarczają obszernego materiału do analizy prawidłowości występujących przy spalaniu paliw ciekłych. Analizując uśrednione wyniki pomiarów uzyskane w poszczególnych seriach można określić jakościowy i ilościowy wpływ głównych parametrów spalania na różne, także uśrednione, charakterystyki procesu. Z kolei analiza różnych zestawów wyników pomiarowych dotyczących lokalnych wartości parametrów wewnątrz płomienia oraz komory spalania może być przydatna przy wyjaśnianiu przebiegu mechanizmów zjawisk zachodzących w czasie spalania paliw ciekłych.

Poniżej zaprezentowane zostaną wybrane zależności i przeprowadzona zostanie analiza wyników poszczególnych serii pomiarowych.

#### 4.5.1. Wpływ stosunku nadmiaru powietrza

Na wstępie analizy wpływu stosunku  $\lambda$  nadmiaru powietrza na spalanie paliwa ciekłego należy zauważyć, że z teorii i praktyki procesu spalania wiadomo, że optymalna wartość tego stosunku, przy spalaniu paliw ciekłych, zawiera się w granicach 1.10-1.25. Rozszerzenie, w niniejszych badaniach, tego zakresu miało cel wyłącznie poznawczy i chodziło o określenie skali wpływu tego parametru na energetyczne i ekologiczne skutki występujące w rzeczywistym procesie.

Dla przykładu, interesujący wydaje się zaobserwowany tu wpływ stosunku  $\lambda$  na temperaturę płomienia i temperaturę spalin w komorze spalania (tablica 4.4). Przy wzroście wartości  $\lambda$  w zakresie od 0.96 do 1.36 stwierdzono wzrost zarówno temperatury płomienia, jak i temperatury spalin, natomiast dla kolejnej wartości  $\lambda$ =1.50 uzyskano dalszy niewielki wzrost temperatury płomienia, ale już spadek temperatury spalin.

Temperatura płomienia jest sprzężonym efektem szybkości reakcji chemicznych oraz bilansu energii reagującego układu. Z pewnym uproszczeniem, przy założeniu całkowitego i zupełnego spalania paliwa, można przyjąć następujący model zachodzących zjawisk. Płomień stanowi układ przepływowy, do którego doprowadzany jest strumień energii w postaci entalpii chemicznej  $I_{chp}$  paliwa, wyzwalanej wewnątrz obszaru w wyniku reakcji chemicznych utleniania. Energia ta wyprowadzana jest z układu dwoma drogami: jako ciepło  $Q_r$  promieniowania oraz entalpia fizyczna  $I_{ff}$  gazów płomieniowych opuszczających układ, przy czym ciepło  $Q_r$  jest efektem netto wymiany energii promienistej pomiędzy płomieniem i jego otoczeniem. Na rysunku 4.7 pokazano schematycznie ten układ.

Jeżeli w wyniku zmiany intensywności bądź charakteru procesów zachodzących w obszarze płomienia następuje zmniejszenie zdolności wypromieniowywania ciepła, czyli



Rys. 4.7. Bilans energii płomienia Fig. 4.7. Energy balance of flame

obniżenie strumienia  $\dot{Q}_r$ , to tym samym wzrasta strumień entalpii  $\dot{I}_{ff}$ . Entalpia  $\dot{I}_{ff}$  zależy od ilości gazów opuszczających obszar płomienia oraz ich temperatury, która z kolei jest ściśle związana z poziomem temperatury panującym wewnątrz płomienia. Im wyższa temperatura wewnątrz płomienia, tym także wyższa temperatura na jego brzegu. Można zatem powiedzieć, że poziom temperatury w płomieniu jest, przy stałym strumieniu paliwa spalanego całkowicie i zupełnie, funkcją ilości wypromieniowanego ciepła oraz ilości gazów płomieniowych.

Badania wskazują, że w przypadku płomieni olejowych wpływ promieniowania jest znacznie większy aniżeli wpływ ilości gazów płomieniowych i kierunek zmiany temperatury





- Rys. 4.8. Wpływ stosunku nadmiaru powietrza na: a) powierzchnię i temperaturę płomienia oraz b) opromieniowanie ścian komory spalania i koncentrację sadzy w płomieniu, przy wydajności palnika 3.8 kg/h
- Fig. 4.8. Influence of air excess ratio on: a) flame temperature and flame surface, b) irradiation of walls of combustion chamber and soot concentration inside flame, for oil fuel rate of 3.8 kg/h

płomienia, wywołanej oddziaływaniem jakiegoś czynnika, jest zawsze odwrotny do kierunku zmiany strumienia wypromieniowywanego ciepła, spowodowanej przez ten czynnik.

Sposób wpływu stosunku nadmiaru powietrza na temperaturę płomienia jest również uzależniony od charakteru zmian zdolności radiacyjnych płomienia wywoływanych przez zmiany stosunku nadmiaru powietrza. Zależność ta dla różnych typów palników olejowych może mieć postać różną. Najczęściej postać ta jest również odmienna od znanej postaci zależności pomiędzy adiabatyczną temperaturą spalania oraz stosunkiem nadmiaru powietrza, a intuicyjnie oczekuje się, że powinny być one podobne.

W omawianych tu badaniach wpływ stosunku  $\lambda$  na parametry płomienia i komory spalania testowano przy stałych parametrach rozpylania, analogicznych do parametrów występujących w jednym z wariantów płomieni z drugiej serii pomiarowej.

Na rysunku 4.8 pokazano, w oparciu o wyniki pierwszej serii pomiarowej, wpływ stosunku nadmiaru powietrza na temperaturę płomienia, jego rozmiary oraz zawartość sadzy w płomieniu, jak również na gęstość gw opromieniowania ścian komory, która jest tu miarą intensywności wymiany ciepła przez promieniowanie w komorze spalania

Na opromieniowanie ścian składa się promieniowanie płomienia i spalin oraz własne promieniowanie ścian. Promieniowanie ścian jest jednakże efektem wtórnym wobec promieniowania płomienia i spalin, gdyż głównie dzięki promieniowaniu tych dwóch ostatnich mediów (oraz ciepłu konwekcji) temperatura ścian osiąga dany poziom. Poziom temperatury ścian komory jest więc funkcją parametrów płomienia obecnego wewnątrz komory i jego zdolności grzejnych.

Przebieg zależności przedstawionych na rysunku 4.8 wskazuje, że stosunek nadmiaru powietrza wyraźnie wpływa na parametry płomienia i komory spalania wówczas,

gdy przyjmuje wartości z zakresu od około 1.15 do około 1.35. Stosowanie wyższych wartości  $\lambda$  nie powoduje już znaczących zmian parametrów płomieni.

Badania wykazały, że wzrost  $\lambda$  powoduje wzrost temperatury płomienia, zmniejszenie jego rozmiarów i obniżenie koncentracji sadzy w płomieniu, a równocześnie następuje obniżenie temperatury ścian komory spalania, co widać w tablicy 4.3, oraz zmniejszenie intensywności promienistej wymiany ciepła w komorze spalania, której miarą jest gęstość opromieniowania ścian.

Wpływ  $\lambda$  na temperaturę płomienia jest tu zatem odmienny od tego, jaki stwierdzono w badaniach omówionych w rozdziale 3.1, gdzie jednakże stosowano inny typ rozpylacza i gdzie, jak oceniono, było to przede wszystkim efektem równoczesnej zmiany warunków rozpylania paliwa.

Należy też zauważyć, że wzrost stosunku  $\lambda$  oznacza odpowiedni wzrost prędkości przepływu powietrza w przekroju wylotowym palnika, a zatem zaobserwowane zmiany parametrów płomienia i komory spalania są sumarycznym efektem wzrostu obu tych wielkości: nadmiaru powietrza i prędkości wypływu powietrza z palnika.

Ze wspomnianych wyżej wcześniejszych badań przedstawionych w rozdziale 3.1, jak również z tych omówionych w rozdziale 3.2, wynika, że skutki, jakie wywołuje wzrost prędkości przepływu powietrza do spalania, podobnie jak i wzrost prędkości przepływu powietrza rozpylającego, zależą od tego, czy ta zmiana prędkości zwiększa czy zmniejsza różnicę pomiędzy prędkościami przepływu powietrza i oleju w rejonie wylotu palnika [5]. Ponieważ z reguły prędkość wypływu oleju z rozpylacza jest większa od prędkości przepływu powietrza do spalania, a w przypadku rozpylaczy dwuczynnikowych jest ona większa nawet kilkakrotnie, przeto wzrost prędkości powietrza powoduje zmniejszenie wspomnianej różnicy prędkości. To zaś, w konsekwencji, zmniejsza intensywność przebiegu procesów zachodzących wewnątrz płomienia i powoduje obniżenie temperatury płomienia.

Można przyjąć, że w przypadku rozpylaczy dwuczynnikowych, charakteryzujących się wysokimi wartościami prędkości wypływu paliwa, rzędu kilkudziesięciu m/s, na skutek unoszenia przez strumień gazu rozpylającego, wpływ zmian znacznie niższych prędkości, jakie ma na wypływie powietrze główne, na temperaturę płomienia jest do pominięcia.

Zaobserwowane w czasie badań zmiany temperatury i innych parametrów płomieni oraz komory spalania są zatem przede wszystkim efektem zmiany stosunku nadmiaru powietrza.

Wzrost stosunku nadmiaru powietrza, prowadzący do wzrostu ilości powietrza kontaktującego się z rozpylonym paliwem w obszarze bliskim wylotu palnika, zwiększa szybkość reakcji spalania. W wyniku tego wzrasta temperatura w miejscu przebiegu reakcji, spalanie zachodzi w mniejszej przestrzeni i dlatego płomień osiąga mniejsze rozmiary oraz obniża się w nim koncentracja sadzy. Z powodu skrócenia czasu przebywania paliwa w obszarze wysokich temperatur oraz zwiększonej zawartości tlenu proces termicznego rozkładu węglowodorów prowadzący do powstawania sadzy w płomieniu zachodzi tu w mniejszym stopniu.

Widać jednakże, że przy zbyt dużych wartościach tego stosunku (na przykład przejście od  $\lambda = 1.36$  do 1.50) wzrost temperatury i zmiana pozostałych parametrów są coraz mniejsze, gdyż coraz bardziej ujawnia się wpływ zwiększonej ilości gazów płomieniowych.

Odmiennie, w porównaniu do płomienia, stosunek nadmiaru powietrza wpływa na temperaturę gazów spalinowych (tablica 4.4), które traktować można jako odrębne medium. Temperatura ta zmieniała się w znacznie mniejszym zakresie i jakościowo inaczej.

Poziom temperatury spalin jest sumarycznym efektem kilku wielkości. Najważniejsze z nich to: energia doprowadzana w postaci entalpii gazów opuszczających obszar płomienia, strumienie ciepła wymienianego na drodze promieniowania z płomieniem i ścianami komory oraz na drodze konwekcji ze ścianami komory, jak również ilość samych spalin. Skutki

energetyczne tych różnych wielkości są przeciwstawne. Wydaje śię, że decydujące znaczenie ma entalpia dopły wających gazów, która jest z kolei funkcją promieniowania płomienia, oraz ilość spalin, która jest różna od ilości gazów opuszczających płomień. Ten drugi czynnik zaczyna przeważać przy wyższych wartościach  $\lambda$  i wówczas obserwuje się obniżenie temperatury spalin.

Przy niskich wartościach stosunku  $\lambda$  w spalinach opuszczających komorę spalania pojawiły się produkty niecałkowitego i niezupełnego spalania: sadza i tlenek węgla. Dotyczy to przypadków spalania oleju w ilościach powietrza bliskich ilości stechiometrycznej, przy czym w jednym przypadku była to ilość nieco niższa od stechiometrycznej. Pojawienie się zatem strat niecałkowitego i niezupełnego spalania nie było tu zaskoczeniem. Świadomie zbadano też takie warianty płomieni, w których spalanie oleju nie przebiega całkowicie i zupełnie. Chodziło głównie o stwierdzenie, w jakim stopniu straty energetyczne wynikające z niecałkowitego i niezupełnego spalania wpływają na termiczne procesy w komorze spalania, w tym na przekazywanie ciepła do ścian komory. Spodziewano się, że przy dużych stratach niecałkowitego spalania nastąpi pogorszenie efektu nagrzewania ścian.

Przebieg zależności pokazanych na rysunku 4.8 wskazuje, że te chemiczne straty energii paliwa przy  $\lambda = 0.96$  i  $\lambda = 1.06$  były jeszcze na tyle niewielkie, że tendencje zmian badanych parametrów nie zostały odwrócone, lecz jedynie ilościowo zmniejszone. Można jednakże oczekiwać, że przy dalszym obniżaniu  $\lambda$  krzywe osiągną swoje ekstremum.

Próby dalszego obniżania stosunku nadmiaru powietrza zostały zaniechane, gdyż ilości sadzy występujące wówczas w spalinach były tak duże, że przedostając się przez otwory miernicze w ścianie komory spalania do pomieszczenia laboratoryjnego uniemożliwiały pracę przy stanowisku badawczym. Widać więc, że ekologiczny aspekt tych strat okazał się ostrzejszym ograniczeniem od ich energetycznej wartości.

Jak wiadomo, emisji sadzy towarzyszy zwykle emisja innych substancji szkodliwych, takich jak: substancje smoliste czy związki węglowodorowe [9, 33, 91]. Można zatem stwierdzić, że ze względu na wzrastającą emisję substancji szkodliwych spalanie paliwa ciekłego winno być prowadzone przy stosunku  $\lambda$  nie mniejszym niż 1.10.

Zwiększenie stosunku  $\lambda$  przyczynia się natomiast do wzrostu emisji innej szkodliwej substancji, a mianowicie tlenków azotu. W tablicy 4.4 widać, że zawartość NO w spalinach opuszczających komorę bardzo silnie zależy od parametrów spalania i dla płomienia 6 ( $\lambda$ =1.50) jest około 3-krotnie wyższa niż dla płomienia 1 ( $\lambda$ =0.96). Decydujący wpływ na emisję tlenków azotu mają, jak dobrze wiadomo, dwa czynniki: stosunek nadmiaru powietrza i temperatura płomienia. Wzrost każdego z nich wpływa, niezależnie od siebie, na wzrost emisji tlenków azotu. W analizowanych przypadkach płomieni olejowych, przy przechodzeniu od  $\lambda$ =0.96 do  $\lambda$ =1.50, kierunki zmiany obu tych parametrów są niekorzystne, gdyż zwiększają emisję tlenków azotu.

Z powyższego wynika, że jeżeli chodzi o emisję zanieczyszczeń (sadza, CO, NO), to za optymalną można uznać wartość stosunku nadmiaru powietrza rzędu 1.20. Przy takiej zatem wartości  $\lambda$  prowadzone były pomiary w kolejnych prezentowanych seriach badawczych, w których bardziej szczegółowej analizie poddano inne parametry wpływające na proces spalania.

#### 4.5.2. Wpływ parametrów rozpylania

Przez parametry rozpylania rozumie się zwykle takie parametry czynników, które są łatwe do zmierzenia podczas procesu rozpylania realizowanego za pomocą rozpylacza. Należą do nich przede wszystkim ciśnienie i temperatura rozpylanego czynnika, a przy stosowaniu rozpylaczy dwuczynnikowych również ilość, rodzaj, ciśnienie i temperatura czynnika rozpylającego. Efekty rozpylania, czyli rozmiary kropel i inne parametry rozpylonej

strugi cieczy, zależą także, i to w istotnej mierze, od rodzaju czynnika rozpylanego oraz rodzaju i konstrukcji rozpylacza.

Określenie samodzielnego ilościowego, a nawet jakościowego wpływu wyłącznie jednego z wymienionych parametrów na rozmiary uzyskiwanych kropel jest trudne i mało przydatne, gdyż stan pozostałych, nie zmienianych wówczas, parametrów może decydować o charakterze tego wpływu. Dla przykładu, wpływ ilości czynnika rozpylającego i jego parametrów na mikrostrukturę otrzymywanej strugi kropel jest w zasadniczy sposób uzależniony od konstrukcji rozpylacza i może się różnić, nawet w sposób jakościowy, dla różnych rozpylaczy. Oznacza to, że przydatność takich zależności byłaby ograniczona dla bardzo wąskiego zakresu przypadków.

Niniejsze badania dotyczą przede wszystkim analizy procesu spalania paliwa ciekłego, na przebieg którego istotny wpływ wywiera rozmiar kropel rozpylonego paliwa, który jest rezultatem wymienionych parametrów rozpylania. Rozpatrzony zatem zostanie wpływ rozmiarów kropel paliwa na parametry uzyskiwanych płomieni.

Wielkością, która reprezentuje rozkład średnic kropel, jest średnia średnica Sautera rozpylonej strugi kropel i ta wielkość jest tu stosowana jako parametr rozpylonej strugi paliwa. Jest to z pewnością parametr, który decydująco wpływa na przebieg procesu.

W drugiej i czwartej serii pomiarowej (wyniki w tablicach 4.5 i 4.7) badano wpływ średnicy Sautera rozpylonego paliwa, przy zachowaniu stałej wartości stosunku nadmiaru powietrza równej 1.20, na analizowane parametry płomieni i komory spalania. Jak już wcześniej wyjaśniano, zmianę średnic kropel osiągano poprzez zmianę ilości sprężonego powietrza doprowadzanego do rozpylacza. Powietrze to oprócz roli czynnika wspomagającego rozpylanie paliwa wpływa też na sam proces spalania, gdyż lokalnie, w pobliżu wylotu rozpylacza, występują pewne zmiany koncentracji utleniacza, jak również dynamiki przepływu czynników. Jednakże, jak to wynika z badań omówionych w rozdziale 3.2 oraz dalszej analizy niniejszych rezultatów, te pozostałe wpływy powietrza rozpylającego na przebieg procesu spalania są do pominięcia w porównaniu z dominującym znaczeniem rozmiarów kropel. Jest to, między innymi, efekt relatywnie małych ilości tego powietrza w stosunku do globalnej ilości powietrza doprowadzanego do spalania.

Dodatkowym celem, dla którego przeprowadzono czwartą serię pomiarową, było zbadanie wpływu rozmiarów i pojemności cieplnej komory, w której zachodzi spalanie oleju, na analizowane wielkości. Zrealizowano to przez zmniejszenie wydajności palnika olejowego, czyli relatywne zwiększenie komory w stosunku do wydajności cieplnej płomienia. Zakres możliwych zmian był tu jednak ograniczony zarówno rozmiarami uzyskiwanych płomieni, jak i pogarszającą się jakością rozpylania, która występowała przy obniżaniu ciśnienia paliwa, niezbędnym dla uzyskania niższej wydajności palnika.

Strumień oleju w tej czwartej serii pomiarowej wynosił 3.3 kg/h, czyli o 13% mniej niż w pozostałych seriach pomiarowych. Taką wydajność rozpylacza uzyskano przez obniżenie ciśnienia oleju przed rozpylaczem do wartości 0.372 MPa. Skutkiem tego było zmniejszenie energii ciśnienia cieczy wykorzystywanej we wstępnym etapie procesu rozpylania, co w konsekwencji spowodowało obniżenie skuteczności całego procesu rozpylania, czyli uzyskanie kropel o większych rozmiarach.

Na rysunku 4.9 pokazano wpływ rozmiarów kropel rozpylanego paliwa, reprezentowanych przez średnicę Sautera, na temperaturę i wielkość zewnętrznej powierzchni płomienia oraz koncentrację sadzy w płomieniu i gęstość opromieniowania ścian komory. Rezultaty dotyczą płomieni uzyskiwanych przy strumieniu paliwa 3.8 kg/h.

Na rysunku 4.11 pokazano podobne zależności dla płomieni uzyskanych przy strumieniu paliwa 3.3 kg/h.





Fig. 4.9. Influence of sizes of droplets on: a) flame temperature and flame surface, b) irradiation of walls of combustion chamber and soot concentration inside flame, for oil fuel rate of 3.8 kg/h



- Rys. 4.10. Wpływ jednostkowego zużycia powietrza rozpylającego na: a) temperaturę i powierzchnię płomienia oraz b) opromieniowanie ścian komory spalania i koncentrację sadzy w płomieniu, przy wydajności palnika 3.8 kg/h
- Fig. 4.10. Influence of amount of atomizing air on: a) flame temperature and flame surface, b) irradiation of walls of combustion chamber and soot concentration inside flame, for oil fuel rate of 3.8 kg/h



- Rys. 4.11. Wpływ rozmiarów kropel na: a) temperaturę i powierzchnię płomienia oraz b) opromieniowanie ścian komory spałania, przy wydajności palnika 3.3 kg/h
- Fig. 4.11. Influence of sizes of droplets on: a) flame temperature and flame surface, b) irradiation of walls of combustion chamber, for oil fuel rate of 3.3 kg/h



Rys. 4.12. Zależność średnicy Sautera widma kropel od jednostkowego zużycia powietrza rozpylającego w rozpylaczu stosowanym w badaniach (schemat rozpylacza na rys. 4.2)

Fig. 4.12. Sauter mean diameter of droplet sizes distribution as a function of amount of atomizing air for atomizer used in tests (shown in figure 4.2.)

67

Z kolei na rysunku 4.10 te same parametry płomienia i komory pokazano w funkcji wskaźnika zużycia powietrza rozpylającego. Wskaźnik zużycia powietrza rozpylającego jest związany ze średnicą Sautera poprzez charakterystykę eksploatacyjną stosowanego rozpylacza. Na rysunku 4.12 pokazano tę charakterystykę dla dwóch wartości ciśnienia oleju przed rozpylaczem: 0.46 MPa, co odpowiada wydajności rozpylacza 3.8 kg/h oraz 0.372 MPa, przy której wydajność wynosi 3.3 kg/h. Należy zatem zauważyć, że zależności pokazane na rysunku 4.10 obowiązują wyłącznie dla tego konkretnego rozpylacza i to wówczas, gdy ciśnienie oleju wynosi 0.46 MPa. Zaprezentowano je po to, aby pokazać, że wpływ ilości powietrza rozpylającego na parametry otrzymanego płomienia jest niewielki, jeśli nie towarzyszy temu istotna zmiana rozmiarów kropel paliwa.

Charakter zależności przedstawionych na rysunkach 4.9 i 4.11 jest bardzo podobny i wskazuje na to, że rozmiar średnic kropel ma zasadniczy wpływ na badane parametry płomienia i komory spalania. Zmniejszenie średnic kropel paliwa skraca czas wszystkich procesów składowych poprzedzających reakcję spalania paliw ciekłych, czyli podgrzewania paliwa, jego odparowania i mieszania par paliwa z powietrzem. Wszystko to sprawia, że cały proces spalania przebiega intensywniej, a skutki tego są podobne do omówionych w poprzednim podrozdziale. Następuje wzrost temperatury płomienia, zmniejszenie jego rozmiarów i obniżenie koncentracji sadzy w płomieniu. W wyniku tych zmian następuje obniżenie temperatury ścian komory i zmniejszenie intensywności wymiany ciepła w komorze. Płomień i spaliny oddają mniej ciepła i przez to temperatura spalin wewnątrz komory i na jej wylocie jest wyższa.

Wzrost rozmiarów kropel daje skutki odwrotne, a przy zbyt dużych średnicach kropel mogłoby dojść do pojawienia się w spalinach sadzy oraz innych niepożądanych składników. Maksymalne rozmiary kropel paliwa uzyskiwano przy braku sprężonego powietrza wspomagającego rozpylanie. Jednak były to jeszcze na tyle małe średnice, że nie spowodowały pojawienia się niekorzystnych skutków ekologicznych.

Wzrost temperatury płomienia, przy zmniejszeniu średnic kropel, przyczynia się do wzrostu emisji tlenków azotu. Skala wzrostu jest tu jednak znacznie mniejsza, niż to odnotowano w pierwszej serii pomiarowej przy wzroście stosunku nadmiaru powietrza, gdyż wówczas poważną rolę odegrała wzrastająca ilość czynnika utleniającego.

Zgodnie z oczekiwaniem poziom temperatury płomieni uzyskiwanych przy mniejszym strumieniu paliwa 3.3 kg/h jest nieco niższy niż przy strumieniu 3.8 kg/h ze względu na relatywnie większy odbiór ciepła od płomienia przez ściany komory. Natomiast rozmiary tych płomieni są nawet nieco większe, a wynika to z gorszego w tym przypadku rozpylania, czyli większych rozmiarów kropel.

#### 4.5.3. Wpływ stanu cieplnego komory

Na przebieg procesu spalania paliw ciekłych oraz na parametry uzyskiwanego płomienia duży wpływ, poza parametrami substratów, ma również poziom temperatury otoczenia płomienia. Przeprowadzono więc pomiary, których celem było określenie wpływu poziomu temperatury ścian komory spalania na parametry płomienia.

Wyodrębnienie wpływu samej temperatury ścian komory wymaga, przy prowadzeniu badań, utrzymywania na niezmienionym poziomie wydajności cieplnej palnika oraz warunków rozpylania (rozmiary kropel) i spalania (stosunek nadmiaru powietrza). Zachowanie powyższych warunków uniemożliwia jednak przeprowadzenie takich pomiarów w stanie ustalonym komory, gdyż wówczas uzyskuje się tylko jeden konkretny poziom temperatury ścian odpowiadający istniejącym warunkom cieplnym układu. Uzyskanie różnych poziomów temperatury ścian możliwe było jedynie w warunkach stanu nieustalonego.



- Rys. 4.13. Zmiany parametrów: a) płomienia temperatura i powierzchnia, oraz b) ścian komory spalania - temperatura i opromieniowanie, w czasie nagrzewania komory przy wydajności palnika 3.8 kg/h
- Fig. 4.13. Time variation of parameters during process of chamber heating: a) flame temperature and flame surface, b) temperature and irradiation of walls of combustion chamber, for oil fuel rate of 3.8 kg/h



Rys. 4.14. Wpływ temperatury ścian na: a) temperaturę i powierzchnię płomienia oraz b) opromieniowanie ścian komory spalania, przy wydajności palnika 3.8 kg/h

Fig. 4.14. Influence of temperature of walls on: a) flame temperature and flame surface, b) irradiation of walls of combustion chamber, for oil fuel rate of 3.8 kg/h

Badania prowadzono w czasie rozgrzewania komory spalania od stanu zimnego, czyli stanu parametrów otoczenia, do stanu zbliżonego do równowagi cieplnej komory. Po zapaleniu palnika w zimnej komorze i ustawieniu właściwych parametrów rozpylania i spalania dokonywano okresowo, najpierw w odstępach 30-minutowych, a później 60minutowych, pomiaru szeregu parametrów płomienia i komory spalania. W tym cyklu pomiarowym nie dokonywano pomiarów zawartości sadzy w płomieniu.

Na rysunku 4.13 pokazano zmianę temperatury i rozmiarów płomienia oraz temperatury i gęstości opromieniowania wewnętrznych powierzchni ścian komory w miarę upływu czasu nagrzewania komory i dochodzenia do stanu ustalonego.

Oczywiste jest, że w analizowanym procesie zmian różnych parametrów, do których dochodzi w trakcie nagrzewania układu, upływający czas nie jest czynnikiem bezpośrednio wpływającym na mechanizm zachodzących tu zjawisk. Wpływ na przebieg tych zjawisk mają fizyczne parametry układu (na przykład temperatura ścian komory), których wartość w nieustalonym procesie zmienia się z upływem czasu. Szybkość zmian tych parametrów, czyli ich zależność od czasu, jest pewną charakterystyką dynamiczną komory, na którą wpływ mają zarówno własności płomienia oraz zachodzące tu procesy cieplne, jak również własności materiałowe nagrzewanego układu. Nie jest to jednak przedmiotem niniejszych badań. Chodziło natomiast o otrzymanie w ten sposób różnego poziomu wartości parametrów termicznych układu.

Wykorzystując uzyskaną zależność temperatury wewnętrznej powierzchni ścian komory od czasu, można otrzymać obraz wpływu tej temperatury ścian na parametry płomienia. Na rysunku 4.14 pokazano wyznaczone postaci tych zależności. Widać, że poziom temperatury ścian komory jest czynnikiem, który znacząco wpływa na parametry płomienia i wymianę ciepła w komorze spalania. Wszystkie mierzone parametry, czyli: temperatura i rozmiary płomienia, temperatura spalin wewnątrz komory i na wylocie z komory oraz opromieniowanie ścian komory, rosną ze wzrostem temperatury ścian. W wyniku wzrostu temperatury ścian zarówno płomień, jak i spaliny są mniej intensywnie wychładzane, a to sprawia, że następuje pewien wzrost temperatury płomienia i dość znaczny wzrost temperatury spalin wewnątrz komory i na jej wylocie.

Ten ogólny wzrost poziomu temperatury w komorze, przy niezmiennych parametrach paliwa i powietrza doprowadzanych do palnika, powoduje wzrost szybkości przepływu gazów płomieniowych i spalin wypełniających komorę, a przez to następuje rozciąganie obszaru spalania i zwiększenie rozmiarów płomienia.



Rys. 4.15. Wpływ temperatury wewnętrznej powierzchni ścian komory spalania na gęstość opromieniowania tych ścian

Fig. 4.15. Irradiation of walls of combustion chamber as a function of temperature of internal surface of walls

Poziom temperatury wewnętrznych powierzchni ścian bardzo istotnie wpływa na wielkość opromieniowania ścian, a zatem również na wartość strumieni ciepła radiacyjnego wymienianego wewnątrz komory. Na rysunku 4.15, na którym zebrano wyniki pomiarów dla wszystkich analizowanych płomieni, widać zależność opromieniowania ścian, w badanej komorze spalania, od temperatury tych ścian. Wpływ temperatury ścian jest tym większy, im temperatura ta jest wyższa.

70

#### 5. RADIACYJNA WYMIANA CIEPŁA W KOMORZE SPALANIA

Dla określenia energetycznych efektów stosowania zróżnicowanych parametrów rozpylania i spalania paliwa ciekłego przeprowadzono obliczenia wymiany ciepła przez promieniowanie w komorze spalania, w których wykorzystano wyniki badań eksperymentalnych opisanych w poprzednim rozdziale. W rezultacie tych obliczeń wyznaczono szereg parametrów radiacyjnych badanych płomieni oraz strumienie energii radiacyjnej przekazywane w komorze spalania. Na tej podstawie przeprowadzono analizę skutków energetycznych spalania oleju przy różnych parametrach stosowanych w procesie.

#### 5.1. Opis układu i modelu obliczeniowego

Laboratoryjna komora spalania opalana paliwem ciekłym stanowi obiekt, w którym proces wymiany ciepła przez promieniowanie można analizować w oparciu o model zaproponowany w pracy [41]. W modelu tym płomień traktowany jest jako odrębny element biorący udział w procesie wymiany energii promienistej. Komora spalania z płomieniem w środku stanowi zatem trójelementowy układ wymiany ciepła przez promieniowanie pokazany na rysunku 5.1.



#### Rys. 5.1. Elementy układu radiacyjnej wymiany ciepła w komorze spalania Fig. 5.1. Elements of radiative heat exchange inside combustion chamber

Elementami tymi są: płomień, ściany komory oraz spaliny wypełniające przestrzeń pomiędzy płomieniem oraz ścianami. Płomień oddaje ciepło do ścian i spalin, spaliny pobierają ciepło od płomienia, a oddają ścianom, natomiast ściany komory odbierają ciepło od płomienia i od spalin i spełniają w układzie rolę obiektu nagrzewanego. Poziom temperatury, jaki osiągają ściany, zarówno w stanie ustalonym, jak i w trakcie nagrzewania, jest rezultatem zachodzącego w komorze spalania procesu przekazywania ciepła, na którego efektywność decydujący wpływ mają zdolności grzejne płomienia olejowego.

W niniejszej pracy przez płomień rozumiana jest ta część obszaru spalania, która daje się wyróżnić wzrokowo przez swoje silne świecenie. Dla tak rozumianego płomienia prowadzono pomiary jego parametrów w badaniach opisanych w poprzednim rozdziale. Przyjęcie takiego kryterium rozróżnienia płomienia od spalin wydaje się być szczególnie uzasadnione w przypadku spalania paliw ciekłych, gdyż przy spalaniu tych paliw można wyraźnie wyznaczyć obszar, który silnie świeci. Obszar ten charakteryzuje się znaczną zawartością cząstek ciekłych i stałych (sadza), które promieniują w całym zakresie widma, a w wysokich temperaturach jasno świecą. Wcześniejsze badania autora wykazały, że przy poprawnym spalaniu oleju, niezależnie od poziomu temperatury panującej w płomieniu, granica jasno świecącego obszaru jest zarazem granicą obecności sadzy w obszarze spalania [97, 98]. Jest to zatem obszar o odmiennych właściwościach fizykochemicznych od reszty gazów spalinowych, czego efektem są zdecydowanie różne zdolności radiacyjne obu tych mediów, a to z kolei istotnie wpływa na proces wymiany ciepła w komorze spalania.

Obliczenia wymiany ciepła przeprowadzono przy założeniu izotermiczności elementów układu. Wartości temperatury izotermicznych elementów wymiany ciepła: płomienia, spalin i ścian komory oraz innych parametrów tych elementów potrzebnych do obliczeń, takich jak: opromieniowanie ścian, powierzchnia płomienia czy koncentracja sadzy, zostały wyznaczone w sposób wyjaśniony w rozdziale 4.3.2 na podstawie wykonanych pomiarów.

Dla przedstawionego układu można zapisać równania na jasność H i opromieniowanie G ścian komory i płomienia.

Na jasność  $\dot{H}_w$ ścian komory składa się emisja własna oraz odbita część opromieniowania ścian:

$$\dot{\mathbf{H}}_{\mathbf{w}} = \dot{\mathbf{E}}_{\mathbf{w}} + \mathbf{R}_{\mathbf{w}} \ddot{\mathbf{G}}_{\mathbf{w}} \,. \tag{5.1}$$

Całkowity strumień energii promieniowania docierającej do ścian komory, czyli opromieniowanie  $G_w$  ścian jest sumą promieniowania pochodzącego od spalin, płomienia i własnego promieniowania ścian. Strumienie emitowane przez płomień i ściany są częściowo absorbowane przez spaliny:

$$G_{w} = F_{w}e_{g} + \phi_{w-w}D_{gw}H_{w} + \phi_{f-w}D_{gf}H_{f}.$$
 (5.2)

Jasność  $\dot{H}_f$  płomienia jest sumą emisji własnej oraz transmitowanej części opromieniowania płomienia:

$$\dot{\mathbf{H}}_{\mathbf{f}} = \dot{\mathbf{E}}_{\mathbf{f}} + \mathbf{D}_{\mathbf{f}} \dot{\mathbf{G}}_{\mathbf{f}} \,. \tag{5.3}$$

Na opromieniowanie  $G_f$  płomienia składają się strumienie energii pochodzącej od spalin i ścian, przy czym strumień od ścian jest częściowo absorbowany przez spaliny:

$$\hat{\mathbf{G}}_{\mathbf{f}} = \mathbf{F}_{\mathbf{f}} \hat{\mathbf{e}}_{\mathbf{g}} + \varphi_{\mathbf{w}-\mathbf{f}} \mathbf{D}_{\mathbf{gw}} \hat{\mathbf{H}}_{\mathbf{w}} \,. \tag{5.4}$$

W przeprowadzonych obliczeniach przyjęto pewne założenia upraszczające.

- Opromieniowanie G<sub>w</sub> ścian komory wyliczono jako iloczyn wielkości wewnętrznej powierzchni F<sub>w</sub> ścian i średniej gęstości opromieniowania ścian. Powierzchnia ścian komory wynosi F<sub>w</sub> =3.946 m<sup>2</sup>.
- Własności promieniste spalin: emisyjność ε<sub>g</sub>, absorpcyjność A<sub>g</sub> i transmisyjność D<sub>g</sub> wyliczano dla składu gazu zmierzonego u wylotu komory uwzględniając promieniowanie CO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>O oraz przyjmując model gazu nieszarego i posługując się wzorami opracowanymi przez Kostowskiego [42].

W przypadku płomieni Nr 1 i 2 w spalinach występuje sadza. Emisyjność  $\varepsilon_g$  spalin, na którą składa się tu emisyjność  $\varepsilon_{gs}$  gazów spalinowych i emisyjność  $\varepsilon_s$  sadzy, wyznaczono posługując się zależnością (5.22). Emisyjność  $\varepsilon_s$  sadzy zawartej w spalinach obliczono za

pomocą zależności (5.23), przyjmując wartości stałej k na podstawie aproksymacyjnego wzoru (5.25) dla temperatury spalin wyznaczonej dla tych przypadków płomieni.

- Płomień, jako bryła będąca zawiesiną cząstek stałych i ciekłych w promieniujących gazach płomieniowych, jest ciałem szarym, dla którego suma absorpcyjności i transmisyjności równa się 1, a absorpcyjność jest równa emisyjności.
- 4. Stosunki konfiguracji powierzchni płomienia i ścian komory wyznaczono jak dla układu Christiansena, w którym płomień stanowił powierzchnię wypukłą, a ściany powierzchnię wklęsłą, oraz wykorzystując zasadę wzajemności.
- 5. W oparciu o dane literaturowe przyjęto wartość  $\varepsilon_w = 0.80$  emisyjności wewnętrznej powierzchni ścian komory spalania wykonanej z cegły szamotowej [60, 63].

Strumień ciepła  $\hat{Q}_w$  pobieranego w wyniku promienistej wymiany ciepła przez ściany komory spalania można wyznaczyć z równania bilansu energii promieniowania dla ściany, którego postać dla obszaru "nad powierzchnią" jest następująca:

$$\hat{\mathbf{Q}}_{\mathbf{w}} = \hat{\mathbf{G}}_{\mathbf{w}} - \hat{\mathbf{H}}_{\mathbf{w}}.$$
 (5.5)

Na strumień ciepła  $\dot{Q}_w$  składają się dwa strumienie: strumień  $\dot{Q}_{f-w}$  wzajemnej wymiany energii promienistej pomiędzy płomieniem a ścianami oraz strumień  $\dot{Q}_{g-w}$  wymiany energii promienistej pomiędzy gazami spalinowymi i ścianami

$$Q_{w} = \dot{Q}_{f-w} + \dot{Q}_{g-w}.$$
 (5.6)

Dla układu wielopowierzchniowego wypełnionego gazem promieniującym można zapisać następujący wzór na strumień ciepła wymienianego pomiędzy tym gazem i jedną ze ścian [42]:

$$\dot{Q}_{g-w} = \frac{F_w \varepsilon_w}{W} (L_{gw} \dot{e}_g - L_w A_{gw} \dot{e}_{cw}), \qquad (5.7)$$

gdzie: e<sub>c</sub> - gęstość emisji własnej ciała czarnego,

W- charakterystyczny wyznacznik układu równań bilansu jasności,

L<sub>gw</sub>, L<sub>w</sub> - czynniki modyfikujące emisyjność i absorpcyjność gazów spalinowych.

Dla analizowanego dwupowierzchniowego układu wyrażenia na W,  $L_{gw}$ , i  $L_w$  mają postać:

$$W = 1 - R_w D_{gw} (\phi_{w-w} + D_f D_{gf} \phi_{w-f}), \qquad (5.8)$$

$$L_{gw} = 1 + D_f D_{gf} \phi_{w-f}, \qquad (5.9)$$

$$L_{\rm w} = 1 + D_{\rm f} D_{\rm gw} \phi_{\rm w-f} \,. \tag{5.10}$$

Za pomocą układu równań (5.1)-(5.7), wykorzystując odpowiednie zależności na emisję własną  $E_w$  ścian i  $E_f$  płomienia:

$$\dot{\mathbf{E}}_{\mathbf{w}} = \mathbf{F}_{\mathbf{w}} \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathbf{w}} \dot{\mathbf{e}}_{\mathbf{cw}}, \tag{5.11}$$

$$\dot{\mathbf{E}}_{\mathbf{f}} = \mathbf{F}_{\mathbf{f}} \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathbf{f}} \dot{\mathbf{e}}_{\mathbf{cf}} \,, \tag{5.12}$$

gdzie:

 $e_{cw} = \sigma_c T_w^4, \qquad (5.13)$ 

$$c_{\rm f} = \sigma_{\rm c} T_{\rm f}^4, \qquad (5.14)$$

jak również zależność pomiędzy emisyjnością ɛf i transmisyjnością Df płomienia:

$$\varepsilon_{\rm f} = 1 - D_{\rm f}, \tag{5.15}$$

można wyznaczyć następujące parametry radiacyjne płomienia i komory spalania:  $\dot{H}_w$ ,  $\dot{H}_f$ ,  $\ddot{G}_f$ ,  $\epsilon_f$ ,  $\dot{Q}_w$ ,  $\dot{Q}_{f-w}$ ,  $\dot{Q}_{e-w}$ .

#### 5.2. Wyniki obliczeń i analiza

#### 5.2.1. Wyniki obliczeń

Na podstawie wyników pomiarów zestawionych w tablicach 4.3-4.6 przeprowadzono obliczenia promienistej wymiany ciepła w komorze spalania. W tablicy 5.1 zebrano rezultaty obliczeń wybranych parametrów charakteryzujących tę wymianę ciepła, a na rysunkach 5.2-5.7 pokazano wpływ badanych parametrów rozpylania i spalania na strumienie ciepła radiacyjnego w komorze spalania oraz na parametry promieniste płomieni.

#### 5.2.2. Bląd wyznaczenia emisyjności płomienia

Emisyjność płomienia wyznaczona w efekcie wyżej omówionych obliczeń jest trzecim, obok temperatury i powierzchni, parametrem decydującym o strumieniu energii radiacyjnej emitowanej przez płomień. Obliczone wartości emisyjności płomienia obarczone są niedokładnością wynikającą z błędów pomiarowych tych parametrów, które wykorzystane były w obliczeniach. Parametrami tymi są: gęstość opromieniowania ścian komory, rozmiary płomienia, wewnętrzne rozmiary komory, skład spalin, temperatura płomienia, temperatura spalin w komorze oraz temperatura ścian komory.

Emisyjność płomienia wyznaczano z zależności, którą uzyskuje się po przekształceniu wzoru (5.3) oraz uwzględnieniu wzorów (5.12) i (5.15):

$$= \frac{\dot{H}_{f} - \dot{G}_{f}}{F_{f} \dot{e}_{cf} - \dot{G}_{f}}.$$
 (5.16)

Błąd Aef oszacowano za pomocą prawa przenoszenia błędów zgodnie ze wzorem

 $\varepsilon_{\rm f} =$ 

$$\Delta \varepsilon_{\rm f} = \left[ \left( \frac{\partial \varepsilon_{\rm f}}{\partial \dot{\rm H}_{\rm f}} \right)^2 \left( \Delta \dot{\rm H}_{\rm f} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varepsilon_{\rm f}}{\partial \dot{\rm G}_{\rm f}} \right)^2 \left( \Delta \ddot{\rm G}_{\rm f} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varepsilon_{\rm f}}{\partial F_{\rm f}} \right)^2 \left( \Delta F_{\rm f} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varepsilon_{\rm f}}{\partial \dot{\rm e}_{\rm cf}} \right)^2 \left( \Delta \dot{\rm e}_{\rm cf} \right)^2 \right)^{0.3}, \quad (5.17)$$

przy czym błędy  $\Delta \dot{H}_{f}$ ,  $\Delta \dot{G}_{f}$ ,  $\Delta F_{f}$  i  $\Delta \dot{e}_{ef}$  występujące we wzorze (5.17) oraz błędy innych potrzebnych funkcji określono także za pomocą prawa przenoszenia błędów. W tablicy 5.2 zebrano wartości emisyjności i oszacowanych błędów ich wyznaczenia dla badanych płomieni.

\*\*\* \*\* \* \* \*\*

Tablica 5.1

Płomień	Jasność ścian	Jasność	Opromien.	Emisja własna	Emisyjność
Nr	τ <sup>ή</sup> .	płomienia	płomienia	płomienia	płomienia
	nw kW	п <sub>f</sub> kW	G <sub>f</sub> kW	E <sub>f</sub> kW	۶ſ
1	400,74	88,71	46,26	81,95	0,851
2	392,51	73,29	36,96	64,14	0,746
3	355,17	40,08	18,98	31,26	0,517
4	336,49	25,61	9,30	20,76	0,447
5	319,40	16,36	5,47	13,14	0,373
6	305,41	12,75	3,94	10,39	0,362
7	381,20	55,84	26,59	50,07	0,777
8	354,05	40,68	18,91	31,59	0,499
9	337,99	30,28	13,44	22,33	0,378
10	329,55	24,70	10,49	18,06	0,330
11	322,42	20,96	9,09	14,85	0,288
12	316,55	17,25	7,56	11,90	0,249
13	40,51	20,31	1,82	19,80	0,705
14	91,80	23,31	3,89	21,98	0,643
15	159,67	27,45	7,07	24,59	0,576
16	219,54	32,00	10,31	27,70	0,564
17	264,87	35,03	13,42	28,94	0,523
18	310,31	37,89	16,03	30,40	0,512
19	340,60	39,69	17,76	31,40	0,514
20	350,35	40,38	18,49	31,67	0,509
21	238,02	46,95	18,42	44,37	0,856
22	216,45	34,70	11,90	29,28	0,522
23	207,06	26,22	8,58	21,40	0,408
24	200,42	21,53	6,44	17,64	0,359
25	193,17	18,06	5,56	14,46	0,310
26	187,64	15,14	4,76	11,87	0,268

77

Tablica 5.2

Błąd wyznaczenia emisyjności płomienia							
Płomień	Emisyjność płomienia	Błąd	Płomień	Emisyjność płomienia	Błąd		
Nr	ε <sub>f</sub>	$\Delta \epsilon_{\rm f}$	Nr	13	$\Delta \epsilon_{\rm f}$		
1	0.851	0.068	14	0.643	0.065		
2	0.746	0.067	15	0.576	0.064		
3	0.517	0.060	16	0.564	0.063		
4	0.447	0.058	17	0.523	0.061		
5	0.373	0.055	18	0.512	0.060		
6	0.362	0.052	19	0.514	0.060		
7	0.777	0.065	20	0.509	0.060		
8	0.499	0.061	21	0.856	0.062		
9	0.378	0.058	22	0.522	0.059		
10	0.330	0.056	23	0.408	0.057		
11	0.288	0.055	24	0.359	0.056		
12	0.249	0.054	25	0.310	0.055		
13	0.705	0.066	26	0.268	0.054		

#### 5.2.3. Analiza wyników

#### 5.2.3.1. Rola płomienia i spalin w radiacyjnej wymianie ciepła

We wszystkich badanych seriach płomieni zwiększenie promienistej wymiany ciepła Q<sub>f-w</sub> pomiędzy płomieniem i ścianami komory osiągano wówczas, gdy, w wyniku zmian warunków rozpylania badź spalania, następował wzrost emisji E, własnego promieniowania płomienia. Zachodziło to najczęściej na skutek wzrostu rozmiarów oraz emisyjności płomienia, pomimo obniżenia jego temperatury (rysunki: 5.2, 4.8, 5.3, 4.9, 5.5, 4.11). Uzyskiwany wzrost wartości strumienia ciepła Q<sub>f-w</sub> wymienianego pomiędzy płomieniem i ścianami był jednak względnie mniejszy aniżeli wzrost emisji E, promieniowania płomienia, gdyż równocześnie zmniejszeniu ulegała różnica temperatury pomiędzy płomieniem i ścianami, mająca duży wpływ na wielkość wzajemnej wymiany ciepła.

Analiza parametrów radiacyjnej wymiany ciepła dla tych wariantów płomieni, które badano w stanach ustalonych komory spalania (płomienie 1-6, 7-12, 21-26) wykazuje, że całkowity strumień ciepła Qw pobieranego drogą promieniowania przez ściany komory, na który składają się: ciepło  $\dot{Q}_{f-w}$  od płomienia i ciepło  $\dot{Q}_{g-w}$  od spalin, rośnie wówczas, gdy rośnie ciepło przekazy wane przez płomień. Wzrost strumienia ciepła Q, jest mniejszy aniżeli wzrost strumienia ciepła Q<sub>f-w</sub> od płomienia, gdyż równocześnie następuje obniżenie wartości strumienia ciepła Q<sub>e-w</sub> od spalin, tym niemniej oznacza to, że promieniowanie płomienia odgrywa decydującą rolę w całym procesie wymiany ciepła w komorze.

Gdy płomień promieniuje słabiej, to wówczas rośnie rola gazów spalinowych w wymianie energii promienistej wewnątrz komory spalania i obserwuje się podwyższenie wartości strumienia ciepła  $Q_{g-w}$ .

Strumienie ciepła  $\hat{Q}_{g-w}$  przyjmują maksymalne wartości, w obrębie badanych serii płomieni, wtedy, gdy promieniowanie płomienia jest najsłabsze, a co za tym idzie - także wartości strumieni ciepła  $\hat{Q}_{f-w}$  są najmniejsze. Te maksymalne wartości strumieni  $\hat{Q}_{g-w}$  są jednak znacznie mniejsze od maksymalnych wartości strumieni  $\hat{Q}_{f-w}$ , które z kolei występują przy wysokim promieniowaniu płomieni. Świadczy to o znacznie większej skuteczności promieniowania płomienia olejowego niż promieniowania spalin. Wyrazem tej prawidłowości jest również fakt, że nawet w tych przypadkach płomieni, w których strumienie ciepła  $\hat{Q}_{f-w}$  są najniższe, to maksymalne, wówczas, wartości strumieni ciepła  $\hat{Q}_{e-w}$  są od nich niewiele wyższe.

W rezultacie najniższe efekty energetyczne w komorze spalania, czyli najniższe wartości strumienia ciepła  $\dot{Q}_w$ , występują wtedy, gdy  $\dot{Q}_{g-w}$  jest większe od  $\dot{Q}_{f-w}$ , czyli gdy głównym czynnikiem grzejnym w komorze spalania są gazy spalinowe.

Dla podniesienia sprawności termicznej procesu przekazywania energii w komorze spalania pożądane jest, aby intensywność promienistej wymiany ciepła była możliwie duża. Intensywność tej wymiany ciepła zależy głównie, jak to wykazano wyżej, od promieniowania płomienia. Podwyższenie zatem zdolności radiacyjnych płomienia jest najlepszym sposobem na poprawę sprawności termicznej procesu. Cel ten można osiągnąć poprzez odpowiednią optymalizację warunków rozpylania i spalania paliwa ciekłego.

Na emisję promieniowania płomienia mają wpływ trzy jego parametry: emisyjność, temperatura i rozmiary. Im one są wyższe, tym płomień więcej energii wypromieniowuje. Jednak w praktyce nie da się w taki sposób wpływać na proces spalania, aby wszystkie te trzy parametry płomienia zwiększać jednocześnie. Z reguły wzrostowi temperatury płomienia, będącemu efektem wzrostu intensywności spalania, towarzyszy zmniejszenie zarówno rozmiarów, jak i emisyjności płomienia i na odwrót.

Niniejsze badania wykazały, że możliwe zmiany temperatury płomienia, jakie uzyskuje się w wyniku zmian parametrów rozpylania bądź spalania, są relatywnie znacznie mniejsze aniżeli towarzyszące im zmiany pozostałych dwóch parametrów. Pomimo więc wpływu temperatury na emisję promieniowania w czwartej potędze o kierunku zmian w promieniowaniu płomienia olejowego decydują z reguły zmiany emisyjności i rozmiarów płomienia, których zakres bywa proporcjonalnie większy.

#### 5.2.3.2. Wpływ parametrów spalania i rozpylania

Na rysunku 5.2 pokazano wpływ stosunku  $\lambda$  nadmiaru powietrza na wielkość emisji własnego promieniowania płomienia i emisyjność płomienia (wykres *a*), oraz na strumienie ciepła radiacyjnego w komorze spalania (wykres *b*):  $\hat{Q}_{f-w}$  - wymiana pomiędzy płomieniem i ścianami,  $\hat{Q}_{g-w}$  - wymiana pomiędzy gazami spalinowymi i ścianami,  $\hat{Q}_w$  - strumień ciepła pochłanianego przez ściany.

Ze wzrostem  $\lambda$  obserwuje się obniżanie zdolności radiacyjnych płomienia. Najwyższe wartości emisyjności i emisji własnej płomienia, wyraźnie wyższe od pozostałych, występują



- Rys. 5.2. Wpływ stosunku nadmiaru powietrza na: a) emisyjność i emisję własną promieniowania płomienia oraz b) strumienie ciepła radiacyjnego w komorze spalania, przy wydajności palnika 3.8 kg/h
- Fig. 5.2. Influence of air excess ratio on: a) flame emissivity and flame emission, b) radiative heat fluxes inside combustion chamber, for oil fuel rate of 3.8 kg/h

dla pierwszych dwóch płomieni ( $\lambda$ =0.96 i 1.06) i są efektem wysokiej zawartości cząstek sadzy w tych płomieniach (patrz tablica 4.3) oraz znacznych rozmiarów płomieni. Z kolei wzrost stosunku  $\lambda$  w zakresie powyżej wartości 1.20 przynosi zmiany coraz mniejsze ilościowo, a przy wzroście  $\lambda$  od 1.36 do 1.50 zmiany są już minimalne.

Wpływ stosunku nadmiaru powietrza na strukturę radiacyjnej wymiany ciepła wewnątrz komory spalania jest także wyraźny. Ze wzrostem  $\lambda$  zmniejsza się strumień ciepła, jaki płomień przekazuje do ścian i jest to skutek obniżających się zdolności radiacyjnych płomienia. Rośnie natomiast strumień ciepła od spalin do ścian, co z kolei jest głównie efektem powiększającej się różnicy temperatur pomiędzy tymi ciałami.

Podobnie jak w przypadku emisyjności i własnego promieniowania płomienia także strumienie ciepła  $Q_{f-w}$ , od płomienia do ścian, dla dwóch pierwszych płomieni są wyraźnie wyższe od pozostałych. Najbardziej istotne obniżenie tych strumieni obserwuje się przy przejściu od zakresu wartości stosunku nadmiaru powietrza mniejszych od 1.10 do wartości większych. Dalszy wzrost stosunku nadmiaru powietrza, ponad 1.20, przynosi już coraz mniejsze zmiany strumienia ciepła  $Q_{f-w}$ .

Z kolei wzrost wartości strumienia ciepła  $\dot{Q}_{g-w}$ , od spalin do ścian, jaki występuje przy wzroście stosunku  $\lambda$ , ma charakter bardziej łagodny i, co do zakresu, jest znacznie mniejszy aniżeli obniżenie wartości strumienia ciepła  $\dot{Q}_{f-w}$ .

W rezultacie, kierunek zmian wartości strumienia ciepła  $\dot{Q}_w$ , pochłanianego przez ściany komory, jest taki sam jak kierunek zmian strumienia ciepła  $\dot{Q}_{f-w}$ , które są większe w swoim zakresie od zmian strumienia ciepła  $\dot{Q}_{g-w}$ . Ze wzrostem stosunku nadmiaru powietrza następuje zatem obniżanie wartości strumienia ciepła przekazywanego do nagrzewanego ciała.

Podsumowując, można stwierdzić, że zwiększanie stesunku nadmiaru powietrza obniża intensywność promienistej wymiany ciepła w komorze spalania. Dla poprawy energetycznego efektu należałoby więc stosować możliwie małe wartości stosunku nadmiaru powietrza, co także pozwala na obniżenie emisji NO<sub>x</sub>, ale ważnym ograniczeniem są tu inne skutki ekologiczne w postaci zwiększonej wówczas emisji takich składników, jak sadza, CO czy WWA.

Mając na uwadze obydwa te kryteria: energetyczne i ekologiczne, należałoby zatem zalecać stosowanie takich możliwie niskich wartości stosunku nadmiaru powietrza, przy których poziom emisji wymienionych wyżej substancji szkodliwych jest jeszcze do zaakceptowania. Dla przeciętnych parametrów rozpylania są to wartości z zakresu 1.15-1.25. Zmiana parametrów rozpylania może wpłynąć także na wartość optymalnego stosunku nadmiaru powietrza

Wpływ warunków *rozpylania* na wymianę ciepła w komorze spalania, można przeanalizować na podstawie rezultatów uzyskanych dla drugiej i czwartej serii badanych płomieni: 7-12 i 21-26.

Badania te prowadzono przy stałym stosunku nadmiaru powietrza równym 1.20, którą to wartość można uznać, jak wykazano wyżej, za optymalną. Badania ujawniły, że przy tym optymalnym stosunku nadmiaru powietrza można dodatkowo, poprzez zapewnienie odpowiednich parametrów rozpylania, istotnie wpływać na przebieg spalania i na osiągane skutki wymiany ciepła w komorze.

Na rysunkach 5.3 i 5.5 pokazano wpływ średnicy Sautera kropel rozpylonego paliwa na emisyjność i emisję własnego promieniowania płomienia oraz na strumienie ciepła radiacyjnego w komorze spalania. Zależności przedstawione na rysunku 5.3 dotyczą płomieni 7-12, a na rysunku 5.5 płomieni 21-26, które otrzymano przy obniżonej wydajności palnika 3.3 kg/h.

Na rysunku 5.4 pokazano, z kolei, te same strumienie ciepła radiacyjnego co na rysunku 5.3, lecz w funkcji wskaźnika zużycia powietrza rozpylającego w palniku. Porównanie postaci zależności pokazanych na rysunkach 5.3 i 5.4 pozwala na ocenę istotności wpływu obu analizowanych parametrów: średnicy kropel i ilości powietrza rozpylającego.

Zastosowany w badaniach zakres zmiany parametrów rozpylania wynika z możliwości technicznych stanowiska badawczego i używanego rozpylacza. Nie wyczerpuje to, naturalnie, możliwości osiągnięcia potencjalnych dalszych ilościowych efektów wynikających z rozszerzenia tego zakresu, zarówno jeśli chodzi o parametry rozpylania, jak i rodzaj paliwa ciekłego.

Charakter zależności zaprezentowanych na rysunkach 5.3 i 5.5 jest podobny co do postaci, natomiast występują różnice w wartościach strumieni ciepła oraz parametrów radiacyjnych płomieni. Wspólną cechą zależności pokazanych na wszystkich czterech wykresach (5.3 *a* i *b*, 5.5 *a* i *b*) jest wzrost wartości radiacyjnych parametrów płomienia oraz wzrost wartości strumieni ciepła: przekazywanego od płomienia do ścian i pochłanianego przez ściany, występujący przy wzroście rozmiarów kropel paliwa.

W celu poprawy intensywności promienistej wymiany ciepła w komorze spalania należałoby zatem postulować zwiększenie rozmiarów kropel rozpylanego paliwa poprzez, na przykład, obniżenie ciśnienia paliwa przed rozpylaczem. Jednakże praktycznym ograniczeniem przy powiększaniu rozmiarów kropel paliwa jest pojawienie się w spalinach sadzy oraz innych negatywnych skutków obniżającej się w takim przypadku intensywności procesu spalania. Także zbytnie obniżenie ciśnienia rozpylania powodować może utrudnienia w pracy rozpylaczy, zwłaszcza tych o niskiej wydajności, w których wewnętrzne kanaliki mają bardzo małe średnice i narażone są na zatykanie.



- Rys. 5.3. Wpływ rozmiarów kropel oleju na: a) emisyjność i emisję własną promieniowania płomienia oraz b) strumienie ciepła radiacyjnego w komorze spalania, przy wydajności palnika 3.8 kg/h
- Fig. 5.3. Influence of sizes of droplets on: a) flame emissivity and flame emission, b) radiative heat fluxes inside combustion chamber, for oil fuel rate of 3.8 kg/h



Rys. 5.4. Wpływ jednostkowego zużycia powietrza rozpylającego na strumienie ciepła radiacyjnego w komorze spalania, przy wydajności palnika 3.8 kg/h

Fig. 5.4. Radiative heat fluxes inside combustion chamber as a function of amount of atomizing air, for oil fuel rate of 3.8 kg/h



- Rys. 5.5. Wpływ rozmiarów kropel oleju na: a) emisyjność i emisję własną promieniowania płomienia oraz b) strumienie ciepła radiacyjnego w komorze spalania, przy wydajności palnika 3.3 kg/h
- Fig. 5.5. Influence of sizes of droplets on: a) flame emissivity and flame emission, b) radiative heat fluxes inside combustion chamber, for oil fuel rate of 3.3 kg/h

Na wspomnianych wykresach widać również, że nachylenie krzywych zmniejsza się w miarę powiększania średnic kropel, co oznacza, że przy dalszym wzroście rozmiarów kropel wzrost parametrów radiacyjnych będzie coraz mniejszy.

W praktyce spalania paliw ciekłych nie ma pojęcia optymalnych parametrów rozpylania paliwa i nie wypracowano też odpowiednich kryteriów do takiej optymalizacji. Przyjmuje się, że poprawne jest takie rozpylanie, które zapewnia całkowite i zupełne wypalenie paliwa. Te niezbyt trudne wymagania da się spełnić przy zastosowaniu szerokiego zakresu parametrów rozpylania i, oczywiście, były one spełnione także w czasie prowadzenia omawianych tu badań. Konstruktorzy i eksploatatorzy palników olejowych starają się zatem uzyskać jak najdrobniejsze rozpylenie paliwa. Spalanie oleju przebiega wówczas intensywnie, a temperatura płomienia jest wysoka.

Jednakże, jak już to wcześniej wykazano, wzrostowi temperatury płomienia towarzyszy zmniejszenie zarówno jego rozmiarów, jak i emisyjności (przy stałej wydajności palnika), a w rezultacie obniżenie zdolności wypromieniowywania swojej energii.

Widać więc, że dążenie do tego, aby w efekcie rozpylania osiągnąć jak najmniejsze rozmiary kropel paliwa w celu zabezpieczenia się przed niecałkowitym i niezupełnym spalaniem jest działaniem podobnym w swoich skutkach do stosowania coraz wyższego stosunku nadmiaru powietrza dla zapewnienia dobrego wypalenia paliwa. I tu także efekty energetyczne w komorze spalania maleją, gdy poprzez drobniejsze rozpylenie paliwa poprawia się intensywność spalania. Lepiej promieniują te płomienie, w których rozmiary kropel paliwa, uzyskanych w efekcie rozpylania, nie są zbyt małe.

Dla obu tych podobnych przypadków niskich parametrów: rozpylania (duże rozmiary kropel paliwa) i spalania (mała wartość stosunku nadmiaru powietrza) praktycznym ograniczeniem przed możliwością dalszego ich obniżenia, w celu podniesienia intensywności promieniowania, jest niebezpieczeństwo pojawienia się w spalinach produktów niecałkowitego i niezupełnego spalania. W niniejszych badaniach zmianę jakości rozpylania uzyskiwano, jak to już wyjaśniano, poprzez zmianę ilości powietrza rozpylającego. Największe rozmiary kropel uzyskiwano wówczas, gdy rozpylanie paliwa zachodziło wyłącznie na skutek ciśnienia oleju, a dopływ powietrza rozpylającego był odcięty. Były to jednak rozmiary jeszcze na tyle małe, że w spalinach opuszczających komorę nie występowały produkty niecałkowitego i niezupełnego spalania. Odmiennie zatem niż to było przy badaniu wpływu stosunku nadmiaru powietrza, nie analizowano takich przypadków rozpylania, przy których wystąpiłyby negatywne skutki spalania.

Określenie maksymalnej wartości średnicy Sautera zbioru kropel, przy której spalanie rozpylonego paliwa ciekłego przynosi najlepsze efekty energetyczne, bez negatywnych skutków ekologicznych, jest trudne, gdyż silnie zależy od rodzaju paliwa i konkretnych warunków spalania. Dla lekkiego oleju opałowego i warunków komory zbliżonych do tych, przy których prowadzono badania najlepsze efekty energetyczne uzyskuje się przy rozmiarach kropel dających wartość średnicy Sautera w zakresie 30-40 µm.

Podsumowując powyższe rozważania dotyczące wpływu jakości rozpylania paliwa na parametry promienistej wymiany ciepła w komorze spalania, można stwierdzić, że przy spalaniu paliwa ciekłego (z wyjątkiem komór spalania silników wysokoprężnych) niecelowe jest dążenie do jak najdrobniejszego rozpylenia, które prowadzi do upodobnienia przebiegu procesu spalania i własności powstającego płomienia do spalania gazu. Płomień olejowy traci wówczas swoje cenne własności, odróżniające go od płomienia gazowego, czyli zdolność do intensywnego przekazywania swojej energii na drodze promieniowania. Aby te własności optymalnie wykorzystać, rozpylanie paliwa ciekłego winno być jedynie na tyle skuteczne, by wykluczyć obecność w spalinach produktów niecałkowitego i niezupełnego spalania.

#### 5.2.3.3. Wpływ stanu cieplnego komory spalania

Parametry płomienia i wartość strumieni ciepła wymienianego pomiędzy elementami układu w komorze spalania zależą również w znacznej mierze od poziomu temperatury ścian komory. Oceny wpływu tego czynnika można dokonać w oparciu o wyniki uzyskane dla trzeciej serii płomieni (płomienie 13-20). Na rysunku 5.6 zaprezentowano wyznaczone zależności.

Pomiary prowadzono w trakcie rozgrzewania ścian komory przy zachowaniu stałych parametrów rozpylania paliwa, a zatem stałej jakości rozpylania oraz przy stałej wartości stosunku nadmiaru powietrza. Wartość tych parametrów była analogiczna jak dla płomienia 8 z drugiej serii płomieni. Na rysunku 5.7 widać, jak strumienie radiacyjnej wymiany ciepła zmieniały się w czasie nagrzewania komory.

Ze wzrostem temperatury ścian komory następował ogólny wzrost poziomu temperatury wewnątrz komory przy równoczesnym znacznym zmniejszeniu różnic temperatury pomiędzy elementami wymieniającymi ciepło, czyli nagrzewanymi ścianami komory a grzejącymi je: płomieniem i gazami spalinowymi. W rezultacie tych zmian wartość strumienia ciepła  $Q_w$  przejmowanego przez ściany spadała. Jednak spadek ten, wynikający głównie z istotnego zmniejszenia strumienia  $Q_{g-w}$  przekazywanego od gazów spalinowych, był częściowo redukowany przez równoczesny niewielki wzrost strumienia  $Q_{f-w}$  przekazywanego od płomienia.

Widać zatem, że ze wzrostem poziomu temperatury w komorze spalania rola promieniowania płomienia olejowego wzrasta, gdyż kierunek zmian jego parametrów wpływających na promieniowanie jest taki, że w efekcie następuje wzrost emisji promieniowania. O ile więc w zimnej komorze spalania udział promieniowania płomienia w ilości ciepła przekazywanego do ścian jest porównywalny do strumienia ciepła przekazywanego przez spaliny, a nawet nieco od nich mniejszy, to w przypadku gorącej komory jego rola znacznie wzrasta.





Rys. 5.6. Wpływ temperatury ścian komory na: a) emisyjność i emisję własną promieniowania płomienia oraz b) strumienie ciepła radiacyjnego w komorze spalania, przy wydajności palnika 3.8 kg/h

Fig. 5.6. Influence of temperature of walls on: a) flame emissivity and flame emission, b) radiative heat fluxes inside combustion chamber, for oil fuel rate of 3.8 kg/h



Rys. 5.7. Zmiany wartości strumieni ciepła radiacyjnego w komorze spalania w czasie nagrzewania komory, przy wydajności palnika 3.8 kg/h

Fig. 5.7. Time variation of values of heat fluxes inside combustion chamber during process of chamber heating, for oil fuel rate of 3.8 kg/h

Przynosić to może korzyści warte uwagi jednak tylko wtedy, jeżeli parametry rozpylania są właściwe, czyli takie, jak wynika to z analizy przedstawionej w rozdziale 5.2.3.2. Przy zbyt drobnym rozpyleniu paliwa rola promieniowania płomienia jest mniejsza od promieniowania spalin i wzrost poziomu temperatury ścian niewiele w tej proporcji zmienia.

#### 5.3. Ocena efektów energetycznych

#### Stan ustalony komory spalania

W analizowanych badaniach, prowadzonych w warunkach stanu ustalonego komory spalania, obejmujących trzy serie płomieni, uzyskano następujące wartości radiacyjnego strumieni ciepła  $Q_w$  pobieranego przez ściany komory:

-	płomienie	1-6	$\bar{Q}_w =$	32.22;	31.81;	27.47;	26.11;	23.55;	22.02 kW,	
-	płomienie	7-12	, Żw =	29.10;	27.99;	27.31;	26.84;	26.39;	25.91 kW,	
-	płomienie	21-26	₿ <sub>w</sub> =	= 28.16,	, 26.75,	26.08,	25.61,	25.16,	24.69 kW.	

Strumień ciepła  $\hat{Q}_w$  jest tutaj miarą efektywności procesu promienistej wymiany ciepła w komorze spalania. Jak wiadomo, w układach wysokotemperaturowych, takich jak komory spalania, przepływ ciepła zachodzi głównie przez promieniowanie, natomiast w znacznie mniejszym stopniu przez konwekcję. Można oszacować, że udział konwekcji w strumieniu ciepła przejmowanym przez ściany niniejszej komory spalania nie przekracza 5%. Upoważnione jest zatem stwierdzenie, że efektywność promienistej wymiany ciepła decyduje o efektywności całego procesu przekazywania energii w komorze spalania.

Jak widać, różnice pomiędzy wartościami  $\hat{Q}_w$  skrajnymi w danej serii płomieni są dosyć duże. Oznacza to, że zaobserwowane zróżnicowanie parametrów płomieni olejowych, wywołane zastosowaniem zróżnicowanych parametrów rozpylania i spalania paliwa, odczuwalnie wpływa na wymianę ciepła w komorze spalania.

Można zdefiniować sprawność η radiacyjnego przekazywania ciepła w komorze spalania jako

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{w}}{\dot{P}W_{d}} \times 100\%.$$
(5.18)

Względny wzrost sprawności  $\delta\eta$ , jaki uzyskano w obrębie danej serii płomieni, określa stosunek różnicy  $\Delta\eta$  skrajnych wartości sprawności  $\eta_i$  w danej serii płomieni do wartości  $\eta_{min}$  najniższej w tej serii

$$\delta \eta = \frac{\Delta \eta}{\eta_{\min}} \times 100\%.$$
 (5.19)

Z kolei oszczędność  $\omega$  energii chemicznej paliwa uzyskaną w obrębie danej serii płomieni, w wyniku poprawy intensywności promienistej wymiany ciepła, wyznaczyć można dzieląc różnicę  $\Delta\eta$  sprawności przez wartość  $\eta_{max}$  najwyższą w tej serii

$$= \frac{\Delta \eta}{\eta_{\text{max}}} \times 100\% \,. \tag{5.20}$$

W tablicy 5.3 zamieszczono wartości powyższych wskaźników dla wymienionych serii płomieni wyliczone w oparciu o wyznaczone strumienie ciepła Q<sub>w</sub>.

-				-
	ob	1100		2
	an	110.21		
_			~ *	~

Płomienie 1. serii		Płomienie	2. serii	Płomienie 4. serii		
Płomień Nr	Sprawność η %	Płomień Nr	Sprawność η %	Płomień Nr	Sprawność η %	
1	71.3	7	64.4	21	71.7	
2	70.4	8	61.9	22	68.1	
3	60.8	9	60.4	23	66.4	
4	57.8	10	59.4	24	65.2	
5	52.1	11	58.4	25	64.1	
6	48.7	12	57.3	26	62.9	
Wzrost sprawn. δη1-6, % δη3-6, %	46.4 24.8	Wzrost sprawn. δη <sub>7-12</sub> , %	12.4	Wzrost sprawn. δη <sub>21-26</sub> , %	14.0	
Oszcz. energii ω <sub>1-6</sub> , % ω <sub>3-6</sub> , %	31.7 19.9	Oszcz. energii ω <sub>7-12</sub> , %	11.0	Oszcz. energii ω <sub>21-26</sub> , %	12.3	

Efekty energetyczne radiacyjnej wymiany ciepła w komorze spalania

Widać, że wzrost sprawności i związane z tym zmniejszenie zużycia paliwa, jakie uzyskano w poszczególnych seriach płomieni, są istotne. Wydaje się więc, że możliwość ich osiągnięcia wyłącznie poprzez odpowiednią regulację parametrów procesu powinna być uświadamiana projektantom i eksploatatorom urządzeń opalanych paliwami ciekłymi.

Szerszego komentarza wymagają szczególnie wysokie wartości tych wskaźników uzyskane w pierwszej serii płomieni, w której zmienianym parametrem był stosunek nadmiaru powietrza. Dla płomieni 1-6 zmieniano go w zakresie 0.96-1.50.

W rozdziale 4.5.1 wyjaśniano już, że badania wpływu stosunku nadmiaru powietrza prowadzono głównie w celach poznawczych, czyli dla sprawdzenia możliwych skutków stosowania różnych wartości tego parametru, mniej zaś w celach optymalizacyjnych. Uzyskane rezultaty są jednak, w swoim ilościowym rozmiarze, raczej nieoczekiwane.

Dla poszczególnych płomieni tej serii stosunek nadmiaru powietrza przyjmował wartości: 0.96; 1.06, 1.17; 1.29; 1.36 i 1.50.

Dwa pierwsze przypadki to płomienie uzyskane przy zbyt małych ilościach powietrza, co spowodowało pojawienie się produktów niecałkowitego i niezupełnego spalania. Z tego też względu, w rzeczywistych instalacjach, nie mogą one być brane pod uwagę. Jednakże widać tu, że straty energii wynikłe ze złego spalania oleju, a przez to z obecności sadzy i CO w spalinach, które dla płomienia 1 wynoszą około 1.6%, a dla płomienia 2 około 0.6%, sa

znacznie mniejsze od przyrostu efektu energetycznego w obrębie komory spalania wynikającego ze wzrostu intensywności promieniowania. Ponieważ jednak ekologiczny aspekt strat niecałkowitego i niezupełnego spalania jest ograniczeniem decydującym, przeto te maksymalne wartości strumienia ciepła  $\hat{Q}_w$  występujące w pierwszej serii płomieni nie są do osiągnięcia.

Z powyższego powodu w tablicy 5.3 zamieszczono, dla pierwszej serii płomieni, również wartości  $\delta\eta_{3-6}$  i  $\omega_{3-6}$ , w których wzięto pod uwagę jedynie cztery warianty płomieni z tej serii, eliminując dwa pierwsze "nieekologiczne" płomienie. Wartości tych wskaźników są już znacznie niższe od  $\delta\eta_{1-6}$  i  $\omega_{1-6}$ , jednak w dalszym ciągu wyraźnie wyższe od rezultatów dla pozostałych dwóch serii płomieni.

Przyczyną tego jest bardzo niska wartość  $\eta_{min}$  w tej serii płomieni, której skutkiem jest stosunkowo duża wartość różnicy  $\Delta \eta$ , ciągle znacznie większa niż w pozostałych dwóch seriach.

Niska wartość  $\eta_{min}$  jest rezultatem niskiej wartości strumienia ciepła  $\hat{Q}_{w6}$ , który uzyskano przy stosunku nadmiaru powietrza 1.50. Są dwa powody takiego stanu: niska emisja własnego promieniowania płomienia oraz słabe promieniowanie gazów spalinowych, które mają w tym przypadku temperaturę niższą aniżeli przy stosunku nadmiaru powietrza 1.36. Jest to sytuacja odmienna od pozostałych przypadków, w których skutki obniżonego promieniowania płomienia były częściowo rekompensowane przez podwyższone wówczas promieniowanie spalin.

Gdyby zatem także pominąć płomień 6 jako zbyt skrajny wariant, o dalekim od praktycznych zastosowań stosunku nadmiaru powietrza, i ograniczyć się do trzech płomieni 3, 4 i 5, to wartości analizowanych wskaźników byłyby równe:  $\delta\eta_{3-5}=16.7\%$  i  $\omega_{3-5}=14.3\%$ .

Jeżeli chodzi o dwie pozostałe serie płomieni, to widać, że efekty energetyczne  $\delta\eta$  i  $\omega$ uzyskane w obrębie tych serii są do siebie podobne, przy czym dla czwartej serii płomieni 21-26 są nieco wyższe niż dla drugiej serii płomieni 7-12. W obu seriach zmienianym parametrem była ilość powietrza rozpylającego, w wyniku czego zmieniała się mikrostruktura rozpylonej strugi paliwa, a przez to także reprezentująca uzyskany zbiór kropel średnica Sautera. Warto tu zauważyć, że nieco wyższe wartości wskaźników  $\delta\eta$  i  $\omega$  dla płomieni 21-26 osiągnięto przy wyższym również, dla tych płomieni, poziomie sprawności  $\eta$ .

Płomienie 21-26 to płomienie otrzymane przy obniżonej wydajności palnika. Mniejszą wydajność uzyskano przez zmniejszenie ciśnienia oleju, co spowodowało pewien wzrost rozmiarów kropel oraz wzrost zdolności radiacyjnych płomieni. W efekcie nastąpiła poprawa skuteczności przekazywania ciepła w komorze spalania.

Dla oceny skali tej poprawy można, przykładowo, wziąć pod uwagę płomienie 7 i 21. Są to płomienie, które otrzymano bez użycia powietrza rozpylającego, przy różnej wydajności palnika, gdzie rozpylanie paliwa zachodziło wyłącznie na skutek ciśnienia oleju. Widać, że z powodu wyższej sprawności  $\eta_{21}$ =71.7% od  $\eta_7$ =64.4% wartość strumienia ciepła  $Q_{w21}$ =28.16 kW, pobieranego przez ściany komory, jest tylko nieznacznie (około 3%) niższa od wartości strumienia ciepła  $Q_{w7}$ =29.10kW, chociaż moc cieplna płomienia 21 jest niższa od mocy płomienia 7 o około 13%. Oznacza to, że przy różnej wydajności rozpylacza uzyskano podobny skutek energetyczny, reprezentowany przez strumień ciepła  $Q_w$ . Obniżenie wydajności zostało niemał całkowicie zrekompensowane poprzez wzrost zdolności promienistych płomienia.

Reasumując, można powiedzieć, że, pomijając szczególne przypadki z pierwszej serii płomieni, niezależne od siebie efekty energetyczne, jakie można osiągnąć przez odpowiedni dobór zarówno parametrów rozpylania, jak i spalania paliwa ciekłego, mogą być rzędu

86

kilkunastu %. Wyższe sprawności termiczne uzyskuje się przy niższych wartościach stosunku nadmiaru powietrza oraz przy większych rozmiarach kropel rozpylonego paliwa.

#### Stan nieustalony komory spalania

W celu dokonania oceny wysokości efektów energetycznych możliwych do uzyskania w nieustalonym procesie nagrzewania komory spalania przeprowadzono dodatkowo pomiary parametrów w komorze spalania podczas rozgrzewania jej za pomocą dwóch różnych płomieni o parametrach rozpylania i spalania analogicznych do płomieni 7 i 12, skrajnych wariantów z drugiej serii badanych płomieni. Wykonywano pomiary dwóch parametrów dotyczących ścian komory: temperatury wewnętrznej powierzchni oraz gęstości opromieniowania. Warto tu wspomnieć, że omawiane wcześniej płomienie 13-20, trzeciej serii, uzyskano w czasie rozgrzewania komory spalania za pomocą płomienia o parametrach rozpylania i spalania analogicznych do płomienia 8.

W tablicy 5.4 zebrano wartości temperatury i gęstości opromieniowania wewnętrznych powierzchni ścian komory zmierzone podczas nagrzewania komory trzema różnymi płomieniami: 7, 8 i 12. Zamieszczone w tablicy wartości temperatury i gęstości opromieniowania są wartościami średnimi wyznaczonymi na podstawie pomiarów w sposób przedstawiony w rozdziałach 4.2.1, 4.2.3 i 4.3.2.

Zróżnicowane parametry radiacyjne rozważanych płomieni spowodowały istotne zróżnicowanie szybkości wzrostu temperatury ścian. Z trzech analizowanych płomieni uzyskano, zgodnie z oczekiwaniami, największą szybkość dla płomienia 7, a najmniejszą dla płomienia 12.

W celu ułatwienia analizy wyników pomiarów zależność temperatury ścian od czasu nagrzewania pokazano graficznie na rysunku 5.8. Widać tu wyraźnie, że okresy czasu potrzebne do osiągnięcia tego samego poziomu temperatury ścian są różne dla różnych płomieni. Im wyższy jest poziom temperatury, do którego są podgrzewane ściany, tym większe są różnice pomiędzy tymi okresami.

Możliwość osiągnięcia stanu ustalonego nagrzewanego układu albo uzyskania pożądanego poziomu temperatury nagrzewanego ciała w krótszym czasie jest równoznaczna z możliwością zmniejszenia zużycia spalanego paliwa.

W oparciu o wartości okresów  $\tau_{12}$  i  $\tau_7$  czasu, potrzebnego do osiągnięcia tego samego poziomu temperatury ścian komory za pomocą płomienia 12 i płomienia 7, można wyznaczyć oszczędność  $\omega$  paliwa wynikającą ze skrócenia czasu nagrzewania

$$\omega = \frac{\Delta \tau}{\tau_{12}} \times 100\%, \qquad (5.21)$$

gdzie  $\Delta \tau$  jest różnicą pomiędzy  $\tau_{12}$  i  $\tau_7$ .

Poniżej podano wartości tego wskaźnika dla różnych poziomów temperatury ścian osiąganych w czasie nagrzewania:

500°C	-	23%	
600°C	-	29%	
700°C	-	35%	
800°C	-	60%.	

Widać, że oszczędność paliwa, w zakresie temperatury nagrzania 500-700 °C, jest na poziomie 23-35%, przy czym ze wzrostem temperatury efekt rośnie. Wyraźnie wyższa od pozostałych wartość wskaźnika dla temperatury 800°C wynika, dodatkowo, z faktu, że jest to poziom temperatury bliski temperaturze ścian występującej w stanie ustalonym komory

#### Wyniki pomiarów w czasie nagrzewania komory

	Płomień	7	Płomień 8			Płomień	12	
Czas	Temp.	Gęstość	Czas	Temp.	Gęstość	Czas	Temp.	Gęstość
	pow.	oprom.		pow.	oprom.		pow.	oprom.
	scian	scian		scian	scian		Sciali	Sciali
min	C	kW/m <sup>2</sup>	min	°C	kW/m <sup>2</sup>	min	°C	kW/m <sup>2</sup>
10	203	14.36				10	138	11.81
20	295	17.20				20	221	13.48
30	351	19.75	30	342	18.88	30	302	16.16
60	522	33.29	60	509	31.50	60	443	24.35
90	648	50.81	90	635	48.15	90	555	35.53
120	725	65.85	120	714	62.94	120	637	47.37
150	771	76.76	150	763	74.35	180	698	58.72
180	815	88.73	210	806	85.78	240	747	69.62
240	840	96.25	270	832	93.44	300	765	74.05
300	864	103.98	330	840	95.89	360	781	78.19
						420	793	81.42
						480	803	84.21
						540	812	86.79

spalania dla przypadku opalania jej płomieniem 12. Zbliżanie się do poziomu temperatury stanu ustalonego powoduje istotne zmniejszenie szybkości wzrostu temperatury i dlatego czas nagrzewania ścian do poziomu 800°C był, w przypadku płomienia 12, znacznie dłuższy od czasu, w którym ten poziom został osiągnięty przy nagrzewaniu płomieniem 7. W przypadku nagrzewania komory płomieniem 7, wartość temperatury ścian równa 800°C jest jeszcze dość odległa od temperatury ścian w stanie ustalonym, przeto tutaj szybkość wzrostu temperatury nie zmniejszyła się tak znacznie. W rezultacie różnica  $\Delta \tau$  obu okresów nagrzewania wyraźnie wzrosła i to dało wysoką wartość wskaźnika  $\omega$ . Nawet jednak pomijając wartość wskaźnika dla 800°C widać, że uzyskany efekt jest znaczny.

W pracy [108] przedstawiono wyniki symulacyjnych obliczeń czasów nagrzewania ścian komory spalania za pomocą płomieni 7, 8 i 12. Nieustalone pole temperatury w ścianach komory wyznaczono numerycznie za pomocą metody bilansów elementarnych. Obliczenia przeprowadzono dla trzech różnych grubości ścian komory: 42 mm, 72 mm i 102 mm (grubość ścian rzeczywistej komory wynosi 72 mm).

Celem pracy było zbadanie, w jakim stopniu pojemność cieplna nagrzewanego ciała wpływa na wielkość analizowanej różnicy czasu nagrzewania. Potrzebne do obliczeń zależności pomiędzy temperaturą powierzchni ścian i strumieniem ciepła pochłanianego przez tę powierzchnię, dla trzech analizowanych przypadków płomieni, otrzymano poprzez aproksymację wyników pomiarów omówionych wyżej badań odpowiednimi postaciami funkcji wielomianowej.



- Rys. 5.8. Zmiany temperatury ścian w czasie nagrzewania komory płomieniami 7, 8 i 12: **x** płomień 7, ♦ płomień 8, płomień 12
- Fig. 5.8. Time variation of temperature of walls during process of heating of chamber by means the flames: **≭** No 7, ◆ No 8, No 12

Wartość analizowanego efektu skrócenia czasu nagrzewania ścian, którą wyznaczono na podstawie obliczeniowych okresów czasu potrzebnych do osiągania kolejnych poziomów temperatury, rosła ze wzrostem temperatury i ze wzrostem grubości ścian. Na wielkość tego efektu, przy różnych grubościach ścian, wpływa jednakże nie tylko zmiana pojemności cieplnej ścian komory, ale także dwa dodatkowe czynniki, które ze zmianą grubości ścian także się zmieniają. Są to: strumień ciepła oddawanego do otoczenia oraz poziom temperatury ścian w stanie ustalonym dla danego przypadku nagrzewania.

Strumień ciepła oddawanego do otoczenia jest większy w przypadku mniejszej grubości ściany, gdyż decyduje o tym temperatura zewnętrznej powierzchni, która rośnie szybciej dla ściany cieńszej. Powoduje to relatywne wydłużenie czasu nagrzewania ściany cieńszej w stosunku do ściany grubszej.

Podobny skutek relatywnego wydłużenia czasu nagrzewania cieńszej ściany wynika także z tego, że poziom temperatury na wewnętrznej powierzchni ściany jest tutaj, w stanie ustalonym, niższy niż dla ściany o większej grubości. Temperatura ścian jest więc bliższa jej poziomowi w stanie ustalonym, co powoduje, jak już wcześniej wyjaśniono, zmniejszenie szybkości wzrostu tej temperatury.

Uwzględniając powyższe uwarunkowania (pomijając zatem wartości wyjątkowo wysokie), wykazano, że wskaźnik w oszczędności paliwa, wynikającej ze skrócenie czasu nagrzewania ścian, dla trzech badanych grubości ścian i różnych poziomów temperatury, zawiera się w przedziale 25%-35%. Są to wartości podobne do wyników uzyskanych w czasie omówionych wyżej pomiarów na stanowisku badawczym.

Reasumując, należy stwierdzić, że efekt energetyczny, jaki można uzyskać w procesie rozgrzewania komory spalania poprzez odpowiedni dobór parametrów rozpylania paliwa ciekłego, jest wyższy niż w stanie ustalonym komory spalania dla tych samych płomieni. Jego średnia wartość w zakresie wykonanych badań wynosiła około 30%.

#### Podsumowanie

Przedstawioną ocenę efektów energetycznych oraz ich analizę może uznać za dobre uzasadnienie poglądu, że przy doborze optymalnych parametrów spalania paliwa ciekłego, poza zapewnieniem podstawowego warunku, jakim są dobre wypalenie paliwa i niski poziom emisji głównych zanieczyszczeń, takich jak: węglowodory, substancje smoliste, CO czy sadza, należy stosować dodatkowe kryterium uwzględniające zdolności promieniste płomienia. Brak świadomości znaczenia tego kryterium jest przyczyną ponoszenia niepotrzebnych strat energetycznych. Rrzeprowadzone badania pokazały, że spełnienie obu kryteriów, czyli zapewnienie dobrego spalanie paliwa i wysokich zdolności radiacyjnych płomienia, jest możliwe.

#### 5.4. Emisyjność płomienia olejowego

Emisyjność jest jednym z trzech parametrów wpływających na promieniowanie każdego ciała, a jego wartość w sposób zasadniczy decyduje o wielkości emisji własnej tego ciała. Wartości emisyjności powierzchni różnych ciał stałych zebrane są w odpowiednich tablicach własności cieplnych [60, 63]. Dla gazów, które promieniują objętościowo i selektywnie, emisyjność wyznacza się dla bryły gazowej w zależności od gęstości optycznej bryły i od jej temperatury [42].

Płomień olejowy jest zawiesiną cząstek stałych i ciekłych w gazie, przy czym zawartość cząstek ciekłych, szybko odparowujących, jest znacznie niższa niż zawartość cząstek stałych w postaci sadzy.

Emisyjność płomieni olejowych może przyjmować wartości bardzo różne w zakresie teoretycznego przedziału 0-1. Decydują o tym głównie: zawartość sadzy, rozmiary płomienia oraz jego temperatura. Jak wykazały badania przeprowadzone w niniejszej pracy, przy tej samej mocy cieplnej płomienia, koncentracja sadzy oraz rozmiary płomienia mogą, w zależności od warunków spalania, przyjmować wartości różniące się pomiędzy sobą kilkakrotnie. Z tego też wynika możliwość podobnego zróżnicowania wartości emisyjności płomienia.

Wartości emisyjności badanych płomieni, zebrane w tablicy 5.1, a wyznaczone w oparciu o obliczenia radiacyjnej wymiany ciepła, zawierają się w przedziale 0.249 - 0.856. Wartości niższe dotyczą płomieni o małych rozmiarach i niższej zawartości cząstek sadzy, które otrzymano przy drobniejszym rozpyleniu paliwa bądź wyższym stosunku nadmiaru powietrza.

W pracy [53] przedstawiono wyniki pomiarów emisyjności płomienia olejowego o parametrach zbliżonych do płomienia 23 z niniejszych badań. Zastosowano metodę Schmidta, opierającą się na pomiarach intensywności promieniowania pochodzącego od badanej bryły płomienia obserwowanej na zimnym i na gorącym tle. Pomiary wykonywano za pomocą pirometru wąskopasmowego o czułości w zakresie długości fal promieniowania  $4.5 - 5.5 \mu m$ leżącym w obszarze "okna" promieniowania gazów spalinowych. Oznacza to, że pirometr rejestruje jedynie promieniowanie od ciał stałych, a wyznaczona emisyjność płomienia jest emisyjnością chmury cząstek sadzy znajdujących się w płomieniu.

W wyniku przeprowadzonych pomiarów wyznaczono emisyjność obserwowanych przez pirometr wycinków bryły płomienia. Wartość tej emisyjności zmieniała się wzdłuż długości płomienia w zakresie 0.477 – 0.143. Można oszacować, że średnia wartość emisyjność badanego płomienia wynosi około 0.360. Biorąc pod uwagę, że jest to jedynie emisyjność sadzy znajdującej się w płomieniu, a zatem po uwzględnieniu emisyjności gazów płomieniowych sumaryczna emisyjność płomienia będzie nieco wyższa, widać, że uzyskany rezultat jest zbliżony do rezultatów otrzymanych w niniejszych badaniach.

Badanie emisyjności płomieni olejowych było też przedmiotem pracy [68]. Metodą Schmidta, za pomocą wąskokątowego pirometru całkowitego promieniowania, określano emisyjność płomieni otrzymywanych przy spalaniu mazutu oraz emulsji mazutowo-wodnej. Dla kilkunastu płomieni, które uzyskiwano przy różnej wydajności palnika, różnym ciśnieniu powietrza rozpylającego i różnych wartościach stosunku nadmiaru powietrza do spalania otrzymano wartości emisyjności wycinków płomieni, obserwowanych za pomocą przyrządu pomiarowego, na poziomie 0.52 – 0.88.

Jak już wspomniano, płomień olejowy jest zawiesiną. W teorii promienistej wymiany ciepła zawiesinę taką traktuje się jako czynnik promieniujący w całej swojej objętości, czyli podobnie jak gaz, ale jego widmo promieniowania ma charakter ciągły, co z kolei odróżnia go od widma gazu. Na emisyjność  $\varepsilon_f$  płomienia olejowego składa się zatem emisyjność  $\varepsilon_{gf}$ promieniujących składników gazów płomieniowych oraz emisyjność  $\varepsilon_s$  cząstek sadzy występujących wewnątrz bryły płomienia, przy czym obowiązuje tu następująca zależność [48]:

$$\varepsilon_{\rm f} = 1 - (1 - \varepsilon_{\rm gf}) (1 - \varepsilon_{\rm s}). \tag{5.22}$$

W przypadku silnie świecących płomieni olejowych dominującą rolę odgrywa emisyjność sadzy, która może być bardzo wysoka. Cząstki sadzy dają ciągłe widmo promieniowania, a ich emisyjność zależy od objętościowej koncentracji c<sub>v</sub> sadzy w bryle płomienia, grubości L promieniującej warstwy i temperatury T<sub>f</sub> płomienia. Na podstawie teoretycznych rozważań, po scałkowaniu wyrażenia na emisyjność spektralną cząstek sadzy zawartych w bryle gazowej oraz przyjęciu założeń upraszczających, uśrednioną wartość emisyjności sadzy można wyznaczyć z następującej zależności [26, 31]:

$$\varepsilon_{\rm s} = 1 - (1 + k \, c_{\rm v} \, L \, T_{\rm f} \, / \, c_2)^4,$$
 (5.23)

gdzie:  $c_2 = 1.439 \cdot 10^{-2} \text{ mK}$  - druga stała Plancka,

k - stała uwzględniająca własności optyczne sadzy.

Znając zatem parametry płomienia występujące we wzorze (5.23) oraz wartość stałej k można obliczyć emisyjność sadzy zawartej w płomieniu, która w rzeczywistości jest bliska sumarycznej emisyjności płomienia olejowego. Pewnym problemem jest tu jednak wartość stałej k.

Dla cząstek idealnie kulistych wartość stałej k mieści się w zakresie 4-6 [16]. Jednakże dla rzeczywistych kształtów cząstek odbiegających od gładkiej powierzchni kulistej wartość ta może być kilkakrotnie wyższa [3<sup>5</sup>]. Nie ma jednoznacznych danych odnośnie do wartości tej stałej dla różnych typów płomieni. Dla płomieni olejowych otrzymano wartości w zakresie 6-14 [80]. Jednakże inne badania, także z płomieniami olejowymi, wskazują z kolei na zakres wartości 15-40 [48].

Badania wykonane w ramach niniejszej pracy również umożliwiają określenie wartości stałej k dla płomieni oleju lekkiego. Wartość tej stałej można wyznaczyć w oparciu o wyniki przeprowadzonych pomiarów temperatury i rozmiarów płomieni, koncentracji sadzy wewnątrz płomieni oraz obliczonych wartości emisyjności płomieni.

Na podstawie wartości emisyjności  $\varepsilon_f$  płomienia, posługując się wzorem (5.22), można wyznaczyć emisyjność  $\varepsilon_s$  sadzy zawartej w tym płomieniu. W tym celu należy wcześniej również wyznaczyć emisyjność  $\varepsilon_{gf}$  gazów płomieniowych. Tę emisyjność wyznaczono z kolei w sposób analogiczny, jak wyznaczano emisyjność gazów spalinowych, co wyjaśniono w punkcie 5.1.

Pod uwagę mogą być tu brane tylko te płomienie, dla których wykonywano pomiary koncentracji sadzy, czyli płomienie 1-12.

W równaniu (5.23) zawartość sadzy jest wyrażona poprzez koncentrację objętościową cząstek sadzy w gazie. Aby uzyskać tę wielkość, należy wyznaczoną w pomiarach koncentrację gramową sadzy podzielić poprzez gęstość sadzy.

Pojawia się tu pewien problem, gdyż w literaturze nie ma jednoznacznych danych dotyczących tej wielkości. Chociaż liczba publikacji odnośnie do sadzy, mechanizmu i okoliczności jej powstawania w procesach spalania jest duża, np. [22, 27, 36, 37, 44, 84], to najczęściej nie ma w nich informacji na temat gęstości sadzy. Wielkość ta jest trudna do zmierzenia, a dodatkowo jej wartość zależy od parametrów i okoliczności powstawania oraz czasu przebywania w płomieniu.

Dane, które można spotkać w literaturze, są dość zróżnicowane. Nawet ci sami autorzy w różnych publikacjach przyjmują różne wartości tego parametru. Na przykład, Hein i Leuckel w jednej pracy przyjmowali wartość 1600 kg/m<sup>3</sup> [30], a w innej 2000 kg/m<sup>3</sup> [50]. Wartość 1650 kg/m<sup>3</sup> przyjmowali Lowes i Newall [51]. Z kolei Newmann i Steciak podają wartość 1100 kg/m<sup>3</sup> [54]. Taką samą też wartość przyjęli w swojej pracy Heilos i Leuckel [28]. Jednakże ci sami autorzy w późniejszej publikacji [29], po przeprowadzeniu swoich własnych pomiarów, stwierdzają, że gęstość sadzy wynosi 1800 kg/m<sup>3</sup>. Tę ostatnią wartość 1800 kg/m<sup>3</sup>, będącą efektem najnowszych badań autorów zajmujących się tym zagadnieniem, przyjęto jako gęstość sadzy do przeliczeń prowadzonych w niniejszej pracy.

W tablicy 5.5 zestawiono rezultaty pomiarów i obliczeń parametrów płomieni potrzebnych do wyznaczenia wartości stałej k z równania (5.23). Dane dotyczące powierzchni płomienia różnią się tu nieco od wartości powierzchni tych płomieni podanych w tablicach 4.3 i 4.4. Są od nich większe, gdyż oznaczają całkowitą powierzchnię zewnętrzną bryły płomienia, której objętość jest równa V<sub>f</sub>. Powierzchnia ta obejmuje również przekrój początkowy płomienia od strony palnika. W tablicach 4.3 – 4.6 podano wartości powierzchni zewnętrznej płomieni, wypromieniowującej ciepło do ścian komory, na którą składa się powierzchnia boczna i końcowa, bez powierzchni czołowej od strony palnika.

Średnią grubość L promieniującej bryły płomienia, występującą we wzorze (5.23), obliczono zgodnie z proponowaną w literaturze zależnością [31, 42]:

$$L = 3.6 \frac{V_f}{F_c}.$$
 (5.24)

Jak widać z tablicy 5.5, wartość stałej k dla przebadanych wariantów płomieni zawiera się w przedziale 16.70 - 24.28. Mieści się to w zakresie wartości podanych w pracy [48]. Daje się również zauważyć wpływ temperatury bryły gazowej na wartość tej stałej. Na rysunku 5.9 przedstawiono tę zależność. Pomimo pewnego rozrzutu wyników widać korelację pomiędzy tymi dwoma parametrami. Przyjmując najprostszą, liniową postać tej zależności, otrzymano następujący wzór aproksymacyjny:

$$k = -1.19 + 1.37 \cdot 10^{-2} \,\mathrm{T_{f}} \tag{5.25}$$

przy współczynniku korelacji r = 0.831. Na rysunku 5.9 pokazano również położenie tej prostej w zakresie temperatur występujących w badanych płomieniach.

Należy zatem stwierdzić, że w rezultacie przeprowadzonych badań uzyskano dane uściślające postać zależności pozwalającej obliczyć emisyjność sadzy zawartej w płomieniu olejowym. Po wyznaczeniu potrzebnych parametrów płomienia, bądź to poprzez pomiary, bądź posługując się zależnościami empirycznymi, podobnymi do przedstawionych w rozdziale 6.2, można oszacować wartość emisyjności sadzy zawartej w płomieniu, a przez to przybliżoną wartość emisyjności płomienia. Tablica 5.5 Wyniki obliczeń parametrów płomieni oraz wartości stałej k z równania (5.23)

Płomień	Temp.	Obietość	Pow	Konc	Emisvin	Emisvin	Emisvin	Stala r
	płom.	płom.	płom.	sadzy	płom.	paz pł	sadzy	(5 23)
	T <sub>f</sub>	$V_f \cdot 10^2$	Ff	$c_v \cdot 10^7$	Er	Eaf	E	(J.2.5) k
Nr	K	$m^3$	$m^2$	$m^3/m^3$		-51	~3	
1	1389	2.691	0.5132	17.63	0.851	0.090	0.836	17.79
2	1423	1.945	0.4146	13.61	0.746	0.080	0.724	16.70
3	1508	0.744	0.2262	7.16	0.517	0.058	0.487	20.44
4	1668	0.313	0.1268	6.82	0.447	0.036	0.427	21.26
5	1759	0.152	0.0793	5.95	0.373	0.030	0.354	23.00
6	1795	0.102	0.0565	5.69	0.362	0.024	0.346	24.28
7	1428	1.174	0.2935	15.03	0.777	0.068	0.760	19.96
8	1525	0.772	0.2215	6.61	0.499	0.052	0.472	19.69
9	1618	0.470	0.1647	4.85	0.378	0.048	0.347	20.07
10	1681	0.331	0.1312	3.95	0.330	0.039	0.303	22.53
11	1710	0.269	0.1152	3.56	0.288	0.037	0.260	21.98
12	1752	0.223	0.1044	3.12	0.249	0.034	0.222	22.17



Rys. 5.9. Wpływ temperatury gazu na stałą k z równania (5.23) Fig. 5.9. Constant of k from equation (5.23) versus gas temperature`

# 6. ZALEŻNOŚCI EMPIRYCZNE

#### 6.1. Zakres opracowanych zależności

Przeprowadzone badania doświadczalne oraz obliczenia radiacyjnej wymiany ciepła w komorze spalania dostarczyły pewnego zestawu danych odnośnie do wartości parametrów płomieni olejowych uzyskanych przy wybranych parametrach spalania i rozpylania lekkiego oleju opałowego w warunkach laboratoryjnej komory o wewnętrznych rozmiarach 0,69x0,72x1,05m, której ściany o grubości 72mm wykonane były z szamotu.

W rozdziale 4 przeprowadzono analizę rezultatów pomiarów głównych parametrów płomieni decydujących o energetycznych efektach spalania paliwa, natomiast w rozdziale 5 dokonano analizy wyników obliczeń parametrów radiacyjnej wymiany ciepła dla tych samych płomieni.

Jak już wcześniej wspomniano, w badaniach stosowano nadmiar powietrza w zakresie wartości stosowanych w rzeczy wistych procesach, natomiast parametry rozpylania dobierano tak, aby z jednej strony zapewnić poprawny przebieg spalania, ale z drugiej móc określić możliwą skalę wpływu tych parametrów na parametry uzyskiwanych płomieni, a przez to na energetyczny efekt w komorze spalania.

Na parametry otrzymywanych płomieni, obok wyżej wymienionych parametrów spalania i rozpylania, wpływają również inne czynniki, takie jak: temperatura ścian komory oraz wielkość komory. Zróżnicowanie tych parametrów było w prowadzonych badaniach uwarunkowane możliwościami stanowiska i zwłaszcza w odniesieniu do wielkości komory zrealizowano je w małym zakresie.

Poziom temperatury wewnętrznej powierzchni komory spalania w stanie ustalonym jest wynikiem równowagi pomiędzy strumieniami ciepła dopływającego i odpływającego od tej powierzchni. Strumień ciepła odpływającego do otoczenia jest głównie funkcją oporu cieplnego przewodzenia, czyli zależy od grubości ściany i współczynnika przewodzenia ciepła materiału ściany. Zatem przy zmienionym oporze przepływu ciepła przez ściany, na przykład po wykonaniu ich z materiału o innej przewodności cieplnej, przy zachowaniu tych samych parametrów spalania i rozpylania paliwa, temperatura na wewnętrznej powierzchni ściany ustali się na innym poziomie.

Istnieje tutaj jednak wzajemne oddziaływanie obu tych czynników, czyli parametrów płomienia i temperatury ścian, w wyniku czego zmiana temperatury ścian wywołana zmianą oporu cieplnego ścian przyczynia się z kolei do zmiany parametrów płomienia.

Strumień ciepła pochłanianego przez ściany zależy przede wszystkim od parametrów płomienia, ale też od temperatury i własności radiacyjnych powierzchni ścian. Z kolej parametry płomienia zależą przede wszystkim od parametrów rozpylania i spalania.

Aby zbadać wpływ temperatury ścian, przeprowadzono pomiary parametrów płomienia i gęstości opromieniowania ścian w trakcie nagrzewania komory od stanu zimnego, przy utrzymywaniu stałego strumienia paliwa oraz stałych parametrów rozpylania i stałego stosunku nadmiaru powietrza. Chociaż wzrost temperatury ścian w czasie nagrzewania był rezultatem obecności płomienia wewnątrz komory, to formalnie można przyjąć, że temperatura ścian była tu zmienną niezależną oddziałującą na płomień.

Wpływ rozmiarów komory na parametry znajdującego się w tej komorze płomienia wynika z kilku przyczyn. Istotna jest tu przede wszystkim wzajemna relacja pomiędzy pojemnością cieplną ścian komory oraz mocą cieplną płomienia, co głównie ujawnia się w procesie nagrzewania komory i wpływa na szybkość zmiany parametrów układu.

Komora o większej objętości wypełniona jest większą ilością spalin, co oznacza, że tworzą one warstwę gazu promieniującego o większej grubości i większej pojemności cieplnej. Przy większych rozmiarach komory występują również większe straty ciepła do otoczenia. Wszystko to sprawia, że w większej komorze płomień oddaje więcej ciepła, przez co jego temperatura ustala się na niższym poziomie.

W niniejszych badaniach wpływ wielkości komory na parametry płomienia można określić w oparciu o rezultaty pomiarów prowadzonych przy innym strumieniu paliwa podawanego do palnika (czwarta seria płomieni). Dla liczbowego ujęcia wielkości komory spalania oraz jej cech cieplnych w odniesieniu do mocy cieplnej płomienia zaproponowano następujące wyrażenie:

$$S = \frac{PW_d}{W_L L_L}$$
,

(6.1)

gdzie: P - strumień oleju,

W<sub>d</sub> - wartość opałowa oleju,

W<sub>k</sub> - pojemność cieplna ścian komory,

Lk - zastępcza grubość warstwy gazu w komorze określana według wzoru (5.24).

We wzorze (6.1) występują czynniki wpływające na temperaturę płomienia. Temperatura płomienia rośnie, gdy wzrasta ilość ciepła wydzielającego się w jego obszarze, co zachodzi przy wzroście mocy cieplnej płomienia. Natomiast wzrost ilości ciepła oddawanego przez płomień, czyli intensywniejsze wychładzanie płomienia, przyczynia się do obniżenia jego temperatury. Następuje to przy większych rozmiarach wewnętrznych i zewnętrznych komory. Wzrost parametru S powoduje więc wzrost temperatury płomienia.

Parametr S wyraża szybkość zmiany temperatury ścian, które mają pojemność cieplną  $W_k$  i rozmiary reprezentowane przez  $L_k$ , na skutek przejmowania ciepła równego mocy cieplnej płomienia.

Można zatem stwierdzić, że w przeprowadzonych badaniach eksperymentalnych, przy ograniczeniach uwarunkowanych możliwościami stanowiska, przeanalizowano wpływ czterech niezależnych parametrów na charakterystyki płomieni uzyskiwanych przy spalaniu lekkiego oleju opałowego. Tymi niezależnymi parametrami były:

- średnica d<sub>s</sub> Sautera kropel paliwa, która jest podstawowym parametrem rozpylania,
- stosunek λ nadmiaru powietrza, który jest podstawowym parametrem spalania,
- temperatura  $T_w$  wewnętrznej powierzchni ścian komory, która charakteryzuje warunki cieplne w komorze,
- parametr S, reprezentujący wielkość komory i pojemność cieplną jej ścian w relacji do mocy cieplnej płomienia.

Naturalnie, poza wyżej wymienionymi parametrami, także inne wielkości mają wpływ na uzyskiwany płomień. Można tu wymienić zwłaszcza takie, które decydują o intensywności tworzenia mieszanki palnej, jak na przykład prędkość wypływu powietrza z palnika, sposób zawirowania powietrza i paliwa, czy wzajemny stosunek prędkości wypływu obu tych czynników. W czasie badań nie zmieniano jednak tych parametrów w sposób niezależny. Ich zmiany, jeżeli miały miejsce, były rezultatem zmian stosunku nadmiaru powietrza i dlatego nie mogą być tu traktowane samodzielnie.

Wymienione wyżej cztery niezależne parametry zmieniane były w czasie prowadzonych badań w następujących zakresach:

d<sub>s</sub> - 8 - 44 μm,

 $\lambda = 1.17 - 1.50$ ,

- Tw- 615-1151 K.
- S 0.161 i 0.186 K/sm.

Prędkość przepływu głównego powietrza do spalania w przekroju wylotowym palnika przyjmowała wartości z zakresu 10.5-14.4 m/s. Moc cieplna badanych płomieni wynosiła 39.3 kW oraz 45.2 kW, natomiast prędkość oleju w otworze wylotowym części ciśnieniowej rozpylacza, przed zetknięciem ze strugą powietrza rozpylającego, 16.7 m/s przy strumieniu oleju 3.8 kg/h i 14.5 m/s przy strumieniu oleju 3.3 kg/h.

Powietrze przepływało przez zawirowywacz łopatkowy, którego łopatki tworzyły z osią palnika kąt 55<sup>0</sup>.

W wyniku przeprowadzonych pomiarów wyznaczono następujące parametry płomieni, decydujące o efektywności procesu przekazywania energii w komorze spalania:

- zewnętrzną powierzchnię bryły płomienia F<sub>f</sub>,

- średnią temperaturę w obszarze płomienia T<sub>f</sub>,

- średnią emisyjność płomienia  $\varepsilon_{f}$ ,

- średnią koncentrację sadzy wewnątrz płomienia cf.

Cząstkowe postaci zależności tych parametrów płomienia od poszczególnych, wymienionych wyżej, niezależnych parametrów i warunków spalania pokazano w formie tabelarycznej i graficznej oraz szerzej je omówiono w rozdziałach 4 i 5. Dla potrzeb projektowych i diagnostycznych byłoby także przydatne opracowanie tych zależności w postaci funkcji wszystkich analizowanych zmiennych niezależnych. Opracowanie takich funkcji jest również formą uogólnienia uzyskanych szczegółowych wyników badań.

Ze względu na złożoność analizowanego procesu nie jest możliwe wyprowadzenie analitycznej postaci zależności pomiędzy uzyskiwanymi parametrami płomieni a wpływającymi na nie parametrami eksploatacyjnymi realizowanego procesu. Dlatego opracowano empiryczne postaci powyższych zależności poprzez aproksymację uzyskanych wyników badań wybranymi funkcjami wielomianowymi.

Pod uwagę wzięto następujące funkcje:

$T_f = f_1(d_S, \lambda, T_w, S),$	(6.2)
$F_f = f_2(d_S, \lambda, T_w, S),$	(6.3)
$\varepsilon_f = f_3(d_S, \lambda, T_w, S),$	(6.4)
$c_f = f_4(d_S, \lambda, T_w).$	(6.5)

Postaci funkcji (6.2), (6.3) i (6.4) wyznaczono w oparciu o wyniki pomiarów 24 płomieni. Nie wzięto tu pod uwagę rezultatów pomiarów dla płomieni nr 1 i 2, w których zastosowano niskie wartości stosunku nadmiaru powietrza. Wystąpiły przez to istotne zmiany mechanizmu procesu spalania oleju, w wyniku których pojawiły się produkty niecałkowitego i niezupelnego spalania. Ponieważ prowadzone badania dotyczyły, w przeważającej większości, przypadków, w których spalanie oleju przebiegało poprawnie, czyli w sposób zapewniający całkowite i zupełne wypalenie paliwa, przeto wyznaczone zależności empiryczne dotyczą tylko takich warunków spalania, w których ten proces zachodzi całkowicie i zupełnie. Nie można więc wykorzystać do tego celu wyników badań płomieni 1 i 2.

Zakres przypadków, w których wystąpiły w istotnych ilościach produkty niecałkowitego i niezupełnego spalania nie był szerzej badany i dlatego nie jest możliwe przeprowadzenie jego odrębnej analizy regresyjnej. Poza tym jest on mało przydatny w praktyce eksploatacyjnej.

Postać funkcji (6.5) określono na podstawie pomiarów w płomieniach nr 3-12. Pomiary koncentracji sadzy prowadzono bowiem w dwóch seriach płomieni: 1-6 i 7-12, jednakże z wyżej wymienionych powodów także tu nie wzięto pod uwagę pomiarów dla płomieni 1 i 2.

#### 6.2. Dobór postaci zależności

Opracowywanie zależności empirycznych obejmuje, poza wyborem parametrów wpływających w sposób istotny na analizowane wielkości, dwa ważne etapy. Są nimi: określenie ogólnej postaci poszukiwanej funkcji oraz identyfikacja szczegółowych parametrów wybranej postaci funkcji.

Jeżeli chodzi o etap pierwszy dotyczący doboru postaci funkcji, to można powiedzieć, że jedna z częściej stosowanych postaci funkcji empirycznych jest postać wielomianu. Inne postaci stosuje się wówczas, gdy z dostępnej wiedzy o badanej zależności wynika że poprawna jest inna jej forma, na przykład wykładnicza.

W niniejszych badaniach przyjęto postać wielomianu drugiego stopnia. Przy tym wyborze kierowano sie charakterem określonych wcześniej i analizowanych cząstkowych zależności parametrów płomienia od badanych parametrów eksploatacyjnych. Można stwierdzić, że w stosowanym w badaniach zakresie parametrów eksploatacyjnych: d<sub>s</sub>, λ, T<sub>w</sub> i S, zależności te mają charakter monotoniczny nie wykazując istnienia istotnych przegieć i ekstremów. Taki charakter zależności jest zgodny z naturą oddziaływania różnych parametrów na przebieg wiekszości rzeczywistych procesów, jeżeli w analizowanym zakresie zmian tych parametrów nie występują jakościowe zmiany mechanizmu procesu. Dopiero jakościowe zmiany mechanizmu procesu są przyczyną występowania ekstremów oraz przegięć funkcji.

W niniejszej pracy skoncentrowano się jednak głównie na zbadaniu skali możliwych skutków energetycznych stosowania różnych parametrów spalania paliw ciekłych, przy czym badania prowadzono przy takich parametrach, w których zapewniony był poprawny przebieg samego procesu spalania. Stosowane zróżnicowanie parametrów wprowadzało zmiany w intensywności przebiegu procesów składowych, czyli zmiany ilościowe, natomiast nie zmieniało ich charakteru. Uzyskiwane parametry płomieni oraz obserwowane efekty ich oddziaływania cieplnego były ilościowa miara tych zmian.

Można zatem przyjąć, że postać wielomianu drugiego stopnia dla funkcji aproksymacyjnych jest w tym przypadku odpowiednia, gdyż umożliwia uzyskanie, w wyniku statystycznych obliczeń, takich wyrażeń, w których wpływy poszczególnych parametrów uzyskają charakter zbliżony do ich fizykalnej natury.

Dla funkcji (6.2) - (6.5) zaproponowano następujące postaci:

$\Gamma_f = a_o +$	$\sum_{i=1}^{n}$	a <sub>i</sub> X <sub>i</sub> ,	(6.6)

and a local diversion of the second second

$$F_f = b_o + \sum_{i=1}^{n} b_i X_i,$$
 (6.7)

$$\varepsilon_{f} = c_{o} + \sum_{i=1}^{n} c_{i} X_{i}, \qquad (6.8)$$

$$c_{\rm f} = d_0 + \sum_{i=1}^n d_i Y_i,$$
 (6.9)

gdzie:  $a_0, b_0, c_0, d_0$  - wyrazy wolne równań empirycznych.

a<sub>i</sub>, b<sub>i</sub>, c<sub>i</sub>, d<sub>i</sub> - współczynniki równań empirycznych,

 $X_i(d_S, \lambda, T_w, S), Y_i(d_S, \lambda, T_w)$  - założone funkcje zmiennych niezależnych.

W drugim etapie doboru zależności empirycznych, dotyczącym wyznaczenia szczegółowych parametrów przyjętej postaci funkcji, posłużono się jedną z możliwych w tym zakresie metod, a mianowicie metoda regresji krokowej. Jest to metoda polecana jako jedna z bardziej efektywnych w literaturze dotyczącej statystycznego opracowania wyników pomiarów [10, 17].

Metoda ta umożliwia eliminację mało istotnych składników zaproponowanego równania aproksymacyjnego i wybór najbardziej optymalnej postaci zależności empirycznej przy przyjętym poziomie ufności.

Do analizy regresvinej przyjmuje się w tej metodzie funkcję aproksymacyjną w postaci wielomianu zawierającego wszystkie możliwe składniki wynikające z założonego stopnia wielomianu oraz z ilości zmiennych niezależnych i w rezultacie procedury regresji krokowej wybierane są wyrazy mające najistotniejszy wpływ na wartości funkcji. Dla przykładu, w przypadku czterech zmiennych niezależnych i drugiego stopnia wielomianu liczba możliwych kombinacji połączenia zmiennych niezależnych w wyrazy wielomianu pierwszego i drugiego stopnia wynosi 14. Taki też czternastoskładnikowy wielomian poddaje się procedurze regresji krokowej, w rezultacie której zostają wybrane te wyrazy wielomianu, które zapewniają wyznaczenie wartości aproksymowanej w granicach mieszczących się w przyjętym przedziale ufności.

Niniejsza analizę przeprowadzono dla 95-procentowego poziomu ufności. Obliczenia aproksymacyjne wykonano przy użycju programu komputerowego opracowanego dla tej metody w Instytucie Techniki Cieplnei Politechniki Ślaskiej w Gliwicach.

W rezultacie przeprowadzonych obliczeń otrzymano następujące empiryczne postaci funkcji (6.2) - (6.5):

$$\Gamma_{\rm f} = a_0 + a_1 \lambda + a_2 \lambda^2 + a_3 d_{\rm S} \, {\rm S} + a_4 d_{\rm S} \, {\rm T}_{\rm w}, \tag{6.10}$$

$$F_{f} = b_{0} + b_{1} \lambda + b_{2} \lambda^{2} + b_{3} d_{S}^{2} + b_{4} d_{S} T_{w} + b_{5} d_{S} S, \qquad (6.11)$$

$$\varepsilon_{f} = c_{o} + c_{1} d_{S} S + c_{2} d_{S} \lambda + c_{3} \lambda T_{w} + c_{4} S, \qquad (6.12)$$
  
$$c_{f} = d_{o} + d_{1} d_{S}^{2} + d_{2} T_{w}. \qquad (6.13)$$

(6.13)

Wartości współczynników równań (6.10) - (6.13) zebrano w tablicy 6.1. Niezależne parametry: ds. S i Tw występujące w tych równaniach należy podstawiać w następujących iednostkach:

- S K/sm.

natomiast obliczone parametry płomienia odpowiednio:  $T_f w K$ ,  $F_f w m'$ ,  $c_f w mg/m'$ .

Tablica 6.1

Nr równania	Współczynnik równania	Jednostka	Współczynnik korelacji R <sup>2</sup>
	$a_0 = -4983$	K	
	$a_1 = 9473 \pm 182$	K	
(6.10)	$a_2 = -3185 \pm 68$	K	95.6%
	$a_3 = -171.0 \pm 9.3$	sm/µm	
	$a_4 = (1.659 \pm 0.147) 10^{-2}$	1/μm	11.0
	$b_0 = 4.5131$	m²	
	$b_1 = -6.3634 \pm 0.0613$	m <sup>2</sup>	a state and the state
(6.11)	$b_2 = 2.1873 \pm 0.0230$	m <sup>2</sup>	98.1%
	$b_3 = (-6.5911 \pm 1.0704) 10^{-5}$	$m^2/\mu m^2$	
	$b_4 = (7.026 \pm 0.496) \ 10^{-6}$	m²/µmK	
	$b_5 = (1.1352 \pm 0.3158) 10^{-2}$	sm³/µmK	
	$c_0 = 0.301$		
	$c_1 = 0.173 \pm 0.007$	sm/µmK	
(6.12)	$c_2 = (-9.61 \pm 1.03)  10^{-3}$	1/µm	98.2%
	$c_3 = (-3.60 \pm 0.58) 10^{-4}$	1/K	
	$c_4 = 1.50 \pm 0.91$	sm/K	
	d <sub>o</sub> = -5846	mg/m <sup>3</sup>	
(6.13)	$d_1 = 1.67 \pm 0.09$	$mg/\mu m^2 m^3$	99.7%
	$d_2 = 5.82 \pm 1.55$	mg/m <sup>3</sup> K	

7. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono wyniki licznych badań eksperymentalnych spalania paliwa ciekłego typu lekkiego oleju opałowego. Przeprowadzone badania i analiza uzyskanych wyników umożliwiają głębsze poznanie mechanizmów zachodzących procesów i występujących zależności w czasie spalania olejów za pomocą palników wyposażonych w różne rozpylacze.

Określono zakres wpływu głównych parametrów substratów spalania oraz stanu cieplnego komory na parametry procesu, jak również wyznaczono szereg danych przydatnych w obliczeniach wymiany ciepła w komorze spalania.

W badaniach główną uwagę poświęcono energetycznym parametrom procesu przyjmując jako podstawę zapewnienie dobrego wypalania paliwa i niską emisję zanieczyszczeń

Otrzymane rezultaty wskazują na potrzebę stosowania, przy doborze optymalnych parametrów pracy palników olejowych, dodatkowego kryterium uwzględniającego zdolności promieniste uzyskiwanego płomienia. Daje to szansę osiągnięcia odpowiednio wysokiego poziomu efektu energetycznego w obrębie komory spalania.

W badaniach używano trzech rozpylaczy: jednego typu ciśnieniowego oraz dwóch rozwiązań rozpylaczy dwuczynnikowych. Badano wpływ parametrów spalania na podstawowe parametry płomieni olejowych, takie jak: temperatura, rozmiary, emisyjność, koncentracja sadzy oraz strumień ciepła przekazywanego do ścian komory.

Badania wykazały, że przebieg zjawisk zachodzących w czasie procesu spalania oleju za pomocą palników oraz występujące zależności są różne, gdy palniki wyposażone są w rozpylacze różnego typu i konstrukcji. Podstawowe znaczenie ma tu sposób oddziaływania poszczególnych parametrów substratów na dwa procesy: rozpylania paliwa oraz intensywność reakcji spalania, a to jest ściśle związane z konstrukcją rozpylacza.

W badaniach zasadniczych, wykonanych przy użyciu rozpylacza dwuczynnikowego, skoncentrowano się na określeniu możliwych do uzyskania przedziałów wartości parametrów płomieni olejowych, przy których zachodzi poprawne wypalanie paliwa, ale równocześnie obserwuje się zróżnicowanie skutków energetycznych występujących w komorze spalania w efekcie oddziaływania tych płomieni. Stwierdzono, że za pomocą parametrów rozpylania oraz parametrów powietrza do spalania można istotnie wpływać na wartości parametrów otrzymywanego płomienia, a skutkiem tego jest wyraźne zróżnicowanie sprawności procesu przekazywania ciepła na drodze promieniowania w obrębie komory spalania. Warunki cieplne panujące w komorze spalania również wywierają istotny wpływ na uzyskiwane efekty spalania oleju.

W zakresie przeprowadzonych badań oceniono, że niezależne od siebie efekty energety czne będące rezultatem odpowiedniego doboru zarówno parametrów rozpylania, jak i spalania paliwa ciekłego mogą, w stanach ustalonych komory spalania, osiągać poziom kilkunastu %, a w nieustalonych procesach nagrzewania są wyższe i sięgają poziomu 30% (tu analizowano tylko wpływ parametrów rozpylania).

Wyższe efekty energetyczne uzyskuje się w komorze spalania wówczas, gdy płomień osiąga wysoką emisję promieniowania. Badania pokazały, że podwyższanie zdolności promienistych płomienia olejowego następuje w rezultacie takich zmian parametrów substratów spalania, które prowadzą do wzrostu emisyjności i rozmiarów płomienia, a nie do wzrostu temperatury płomienia. Nie da się bowiem w taki sposób wpływać na proces spalania, aby wszystkie te trzy parametry płomienia zwiększać jednocześnie. Zmiany temperatury mają z reguły kierunek przeciwny do zmian emisyjności i rozmiarów płomienia, a względny zakres zmian temperatury jest znacznie mniejszy od równoczesnych zmian

pozostałych dwóch parametrów. Dlatego też o kierunku zmian emisji promieniowania płomienia decyduje kierunek zmian emisyjności i rozmiarów płomienia.

Z tego punktu widzenia nie jest zatem celowe stosowanie zbyt drobnego rozpylenia paliwa, gdyż prowadzi to do wzrostu intensywności procesu spalania, którego skutkiem jest wzrost temperatury płomienia i obniżenie intensywności wymiany cipła w komorze spalania.

Do szczególnie, oryginalnych osiągnięć pracy należy zaliczyć:

- wykonanie badań eksperymentalnych, obejmujących szeroki zakres parametrów, dla licznych grup płomieni olejowych uzyskiwanych przy zastosowaniu różnych typów rozpylaczy; identyfikacja występujących prawidłowości, ich analiza i interpretacja,
- wykazanie możliwości i wyjaśnienie przyczyn występowania odmiennego charakteru wpływu parametrów powietrza wentylatorowego i powietrza sprężonego (rozpylającego) na temperaturę uzyskiwanego płomienia przy różnych konstrukcjach rozpylaczy paliwa,
- opracowanie zależności empirycznych pomiędzy podstawowymi parametrami płomienia olejowego a głównymi parametrami spalania obowiązujących w badanym zakresie parametrów substratów i warunków spalania oleju,
- przeprowadzenie analizy roli promieniowania płomienia olejowego w procesie radiacyjnej wymiany ciepła w komorze spalania; wyznaczenie wartości parametrów radiacyjnych płomieni oraz zakresu praktycznie możliwego wpływu na ich wielkość,
- przeprowadzenie oceny efektów energetycznych zmian intensywności radiacyjnej wymiany ciepła w komorze spalania spowodowanych zastosowaniem zróżnicowanych parametrów rozpylania i spalania paliwa; sformułowanie postulatu uwzględniania zdolności radiacyjnych płomienia przy doborze parametrów pracy palnika olejowego,
- przeprowadzenie badań emisyjności płomieni olejowych w aspekcie uszczegółowienia danych dotyczących wzoru na emisyjność zawiesiny sadzy w gazie; określenie zakresu wartości stałej uwzględniającej własności optyczne sadzy oraz jej związku z temperaturą gazu,
- dopracowanie metodyki pomiaru zawartości sadzy wewnątrz obszaru płomienia; przeprowadzenie odrębnych badań nad doborem odpowiedniego materiału na filtry.

Zaprezentowane w pracy badania przeprowadzono przy użyciu konkretnych rozwiązań rozpylaczy, na stanowiskach laboratoryjnych, stosując jako paliwo olej napędowy. Te warunki badawcze stanowią naturalne ograniczenie dla pełnej uniwersalności stwierdzonych prawidłowości, zwłaszcza jeżeli chodzi o ich zastosowanie do palników o dużej wydajności oraz do paliw cięższych. Można sądzić, że w tych innych warunkach efekty ilościowe będą miały nieco inny rozmiar, jednak wykryte tendencje zachowają swoją słuszność.

Rezultaty pracy są oryginalnym wkładem w nieco schematycznie postrzegany i stosunkowo mało zbadany obszar spalania.

animale site portroles analogs around a pix spin go analyzing some prists and pix absticles analyzing a dynamic scattering analyzing spin and pixeling spin and pixel and also a physically analyzing a dynamic scattering and analyzing spin and pixeling and a det a physically analyzing the symplectic scattering of pixeling spin and pixeling a dynamic and also a physically analyzing the symplectic scattering of the second pixel pixeling and analyzing an how they also as the symplectic scattering and a size of the symplectic scattering based on a second pixel is an allocation of the pixeling and analyzing the symplectic scattering the second pixel is also as a size of second and an also also a second pixel is a second pixel in the symplectic scattering and second and an also also a second pixel is a second pixel in the symplectic scattering and second and an also also a second pixel is a second pixel in the symplectic scattering and second pixel is a second pixel in the symplectic scattering and pixel in the spin of the spin of the spin of the second pixel is a spin of the symplectic scattering and the spin of the spin of

# LITERATURA

- 1. Arscott J.A., Godridge A.M.: Flame data from a large residual fuel oil-fired burner. 17-th Symp. (Intern.) on Comb., The Comb. Inst., 1978, 735-745.
- 2. Bachalo W.D.: Injection, dispersion and combustion of liquid fuels. 25-th Symp.(Intern.) on Comb., The Comb. Inst., 1994, 333-344.
- 3. Barbella R., Beretta F. and oth.: Spray-swirl interaction and early pyrolysis of kerosene and light oil spray flames produced by simplex pressure atomizer. 22-th Symp. (Intern.) on Comb., The Comb. Inst., 1988, 1983-1990.
- 4. Barreiros A., Carvalho M.G., Costa M., Lockwood F.: Prediction of the near burner region and measurements of NO<sub>x</sub> and particulate emission in heavy fuel oil spray flames. Comb. and Flame, 92, 1993, 231-240.
- 5. Bartok W., Sarofim A.F.: Fossil fuel combustion. John Wiley & Sons, Inc. New York 1991.
- 6. Beck J.V.: Inverse Heat Conduction. A. Villey Intersc. Publ., New York 1985.
- 7. Beer J., Chigier N.: Combustion aerodynamics. Appl. Sc. Pub. Ltd., London 1972.
- 8. Beer J.M., Howarth C.R.: Radiation from flames in furnaces. 12-th Symp. (Intern.) on Comb. The Comb. Inst., 1969.
- 9. Benecchi S. and oth.: PAH's and soot measurements in laminar premixed flames of diesel oil. 26-th Intern. Symp. on Comb., The Comb. Inst., Napoli 1996.
- 10. Brandt S.: Statistical and computational methods in data analysis. North Holland Publ. Comp., Amsterdam, London 1970.
- 11. Chigier N.A.: Group combustion models and laser diagnostic methods in sprays: A review. Comb. and Flame, Vol.51, 1983, 127-139.
- 12. Chigier N.A.: The atomization and burning of liquid fuel sprays. Progr. in Energy and Comb. Sc., 2, 1978, 97-114.
- 13. Costa M., Costen P., Lockwood F.C.: Combustion measurements in a heavy fuel oil-fired furnace. Comb. Sc. and Techn., 75, 1991, 129-154.
- 14. Crookes R., Kiannejad F., Nazha M., Sivalingam G.: Soot formation in spray flames at elevated pressures. Joint Meet. of The Port., British, Spanish and Sweden Sect. of The Comb. Inst., 1996, 21.4.1-4.
- 15. Crookes R., Nazha M.: Measurement and prediction of soot and gaseous species in a burning fuel spray at elevated pressure. Arch. Comb., 10, 1-4, 1990, 49-69.
- 16. Dalzell W.H., Sarofim A.F.: Optical constants of soot and their application to heat-flux calculations. Trans. ASME C, J. Heat Transfer, 91,1969,100-104.
- 17. Draper N.R., Smith H.: Analiza regresji stosowana. PWN, Warszawa 1973.
- 18. Dugue J., Weber R.: Laser velocimetry in semi-industrial natural gas, oil and coal flames by means of a water-cooled LDV probe. 6-th Intern. Symp. on Appl. of Laser in Anemometry in Fluid Mechanics, Lisboa 1992.
- 19. Feath G.M.: Evaporation and combustion of sprays. Progr. in Energy and Comb. Sc., 9, 1983, 1-76.
- 20. Feath G.M.: Mixing, transport and combustion in sprays. Progr. in Energy and Comb. Sc., 13, 1987, 293-345.
- 21. Fodemski T.R. (red.): Pomiary. Cz.I Podstawowe pomiary cieplne. WNT, Warszawa 2001.
- 22. Glassman I.: Soot formation in combustion processes. XXII-th Symp. on Comb. The Comb. Inst., 1988, 295-311.
- 23. Godridge A.M.: Heat transfer properties of large oil flames. 7-th IFRF Members Conference, Holland 1983.

- Gollahalli S.R., Nasrullah M.K., Bhashi J.H.: Combustion and emission characteristics of burning sprays of a residual oil and its emulsions with water. Comb. and Flame, 55, 1984, 93-103.
- 25. Gore J., Skinner S., Stroup D., Madrzykowski D., Evans D.: Structure and radiation properties of large two-phase flames. Winter Meeting of the ASME "Heat Transfer in Combustion Systems", San Francisco 1989.
- 26. Gray W.A., Kilham J.K., Müller R.: Heat transfer from flames. Paul Elek (Sc. Books) Ltd, London 1976.
- 27. Haynes B.S., Wagner H.G.: Soot formation. Progr. in Energy and Comb. Sci. Vol.7, 1981, 229-273.
- Heilos A., Leuckel W.: Experimental and theoretical analysis of radiative heat emission from luminous turbulent flames. 3<sup>rd</sup> European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Lisbon 1995.
- 29. Heilos A., Leuckel W.: Investigation of the local radiation properties of flame soot in fueloil and propane flames. 26-th Intern. Symp. on Comb., The Comb. Inst., Napoli 1996.
- 30. Hein K., Leuckel W.: The formation, combustion and radiation of soot in luminous fuel oil and gas diffusion flames. IFRF Doc. Nr K20/a/46 Ijmuiden 1969.
- 31. Hottel H.C., Sarofim A.F.: Radiative transfer. McGraw-Hill, New York 1967.
- 32. IFRF Technical Services. 1970 CA Ijmuiden 1994.
- 33. Jarosiński J.: Techniki czystego spalania. WNT, Warszawa 1996.
- 34. Jasuja A.K., Lefebvre A.H.: Influence of ambient pressure on drop-size and velocity distribution in dense sprays. 25-th Symp. (Intern.) on Comb., The Comb. Inst., 1994, 345-352.
- Jones A.R.: Scattering and emission of radiation by clouds of elongated particles. J. Phys. D: Appl. Phys. 5, 1972.
- 36. Kent J.H., Honnery D.R.: A soot formation rate map for a laminar ethylene diffusion flame. Comb. and Flame, 79, 1990, 287-298.
- Kent J.H., Wagner H.G.: Why do diffusion flames emit smoke? Comb. Sc. and Techn., Vol.41, 1984, 245-269.
- 38. Khalil E.E., Whitelaw J.H.: Aerodynamic and thermodynamic characterization of kerosene-spray flame. 16-th Symp. (Intern.) on Comb., The Comb. Inst., 1977, 569-576.
- 39. Kochel Z., Zieliński Z., Zajdel A., Wilk R., Błaszczyk J.: Niskociśnieniowy palnik do spalania ciężkich paliw ciekłych. Patent Nr 155391, UP RP 31.01.1992.
- 40. Kochel Z., Zieliński Z., Zajdel A.: Palnik do spalania paliw ciekłych. Patent Nr 155719, UP RP 31.07.1992.
- 41. Kostowski E. (red.): Zbiór zadań z przepływu ciepła. Skrypt Nr 1996, Wyd. Pol. Śl. Gliwice 1996.
- 42. Kostowski E.: Analiza czynników wpływających na zużycie paliwa podczas nagrzewania wsadu w piecu wgłębnym. Zesz. Nauk. Pol. Śl. Energetyka z. 49, pr. hab., 1973.
- 43. Kostowski E.: Promieniowanie cieplne. WN PWN, Warszawa 1993.
- 44. Köylü Ü.Ö., Faeth G.M., Farias T.L., Carvalho M.G.: Fractal and projected structure properties of soot aggregates. Comb. and Flame, 100, 1995, 621-633.
- 45. Koziński J.: The influence of atomizing air parameters on soot formation in heavy liquid hydrocarbon flames. Fuel Proc. Technol., 27, 1991, 215-233.
- 46. Kwaśny J.: Badanie płomienia olejowego o rozpylaniu ciśnieniowym. Praca magisterska, ITC Pol. Śl., Gliwice 1988.
- 47. Law C.K.: Recent advantages in droplet vaporization and combustion. Progr. in Energy and Comb. Sc., 8, 1982, 171-201.
- 48. Lawn C.J. (ed.): Principles of combustion engineering for boilers. Acad. Press, London 1987.

- 49. Lefebvre A.H.: Atomization and sprays. Hem. Publ. Corp. Taylor & Francis, Levitton 1989.
- 50. Leuckel W.: Methods to investigate the emission of total radiation from luminous industrial oil and gas flames. IFRF Members Conference, Ijmuiden 1969.
- 51. Lowes T.M., Newall A.J.: The emissivities of flame soot dispersions. Comb. and Flame, 16, 1971, 191-194.
- 52. Munz N., Eisenklam P.: The modelling of a high intensity spray combustion chamber. 16-th Symp. (Intern.) on Comb., The Comb. Inst., 1976, 593-604.
- 53. Nadziakiewicz J., Zajdel A.: Badanie emisyjności płomieni olejowych. Zesz. Nauk. Pol. Śl. Energetyka z.124, 1995, 79-86.
- 54. Newmann J.S., Steciak J.: Characterization of particulates from diffusion flames. Comb. and flame., 67, 1987, 55-64.
- 55. Onuma Y., Ogasawara M., Inoue T.: Further experiments on the structure of a spray combustion flame., 16-th Symp. (Intern.) on Comb., The Comb. Inst., 1977, 561-567.
- 56. Onuma Y., Ogasawara M.: Studies on the structure of a spray combustion flame, 15-th Symp. (Intern.) on Comb., The Comb. Inst., 1975, 453-465.
- 57. Orzechowski Z., Prywer J.: Rozpylanie cieczy w urządzeniach energetycznych. WNT, Warszawa 1994.
- 58. Orzechowski Z., Prywer J.: Rozpylanie cieczy. WNT, Warszawa 1991.
- 59. Presser C., Gupta A.K., Avedisian C.T., Semerjian H.G.: Fuel property effects on the structure of spray flames. 23-th Symp. (Intern.) on Comb., The Comb. Inst., 1990, 1361-1367.
- 60. Ražnjević K.: Tablice cieplne z wykresami. WNT, Warszawa 1966.
- 61. Reiser S.: Badanie wpływu parametrów rozpylania paliwa na własności płomieni olejowych. Praca magisterska, ITC Pol. Śl., Gliwice 1991.
- 62. Remenyi K .: Combustion stability. Akad. Kiado, Budapest 1980.
- 63. Rudnicki Z.: Radiacyjny przepływ ciepła w piecach przemysłowych. Skrypt Nr 2070, Wyd. Pol. Śl., Gliwice 1999.
- 64. Sacadura J.F., Miranda A.B.: Radiative transfer modelling: A survey of the current capabilities for non-gray participating media. Heat Trans. in Rad. and Comb. System-2, Eurotherm 37, Saluggia 1994, 13-33.
- 65. Sarofim A.F., Hottel H.C.: Radiative transfer in combustion chambers: influence of alternative fuels. 7-th Int. Heat Transf. Conf., Vol.6, 1978, 199-217.
- Sayre A.N., Dugue J., Weber R., Domnick J., Lindenthal A.: Characterization of semiindustrial-scale fuel-oil sprays issued from a Y-jet atomiser. Journ. of The Inst. of Energy, 67, 1994, 70-77.
- 67. Sayre A.N.: Measurement and interpretation of flames issued from a generic multi-fuel burner. Pacific Rim Intern. Conf. "Environ. Control of Comb. Proc.", AJFRC of IFRF, Hawaii 1994.
- 68. Sekuła R.: Emisyjność promieniowania płomienia w procesie spalania ciężkiego paliwa ciekłego. Praca doktorska, AGH, Kraków 1996.
- 69. Selçuk N.: Evaluation of multi-dimensional flux models for radiative transfer in combustors. Heat Trans. in Rad. and Comb. System-2, Eurotherm 37, Saluggia 1994, 411-427.
- Sichel M., Palaniswamy S.: Sheath combustion of sprays. 20-th Symp. (Intern.) on Comb., The Comb. Inst., 1984, 1789-1798.
- 71. Sirignano W.A.: Fuel droplet vaporization and spray combustion theory. Progr. in Energy and Comb. Sc., 9, 1983, 291-322.
- 72. Sjögren A.: Soot formation by combustion of an atomized liquid fuel. 14-th Symp. (Intern.) on Comb., The Comb. Inst., 1973, 919-929.

- 73. Skorek J., Zajdel A.: Applying inverse technique for estimation of the thermal effects of combustion of liquid fuel. IX Symp. Wym. Ciepła i Masy, KTiS PAN, Augustów 1995.
- Słupek S., Koziński J.: Prediction of soot concentration in fuel oil-water emulsion flames. Arch. Combust., Vol.8., 3-4, 1988, 307-317.
- 75. Słupek S., Koziński J.: Soot concentration field in flames of heavy liquid fuels. 11-th Intern. Coll. Dynam. Expl. React. Syst., Warsaw 1987.
- 76. Suyari M., Lefebvre A.H.: Drop-size measurements in air-assist swirl atomizer sprays. Central St. Comb. Inst. Spring Meeting NASA-Lewis Research Center, Cleveland, Ohio 1986.
- 77. Szargut J., Ziębik A.: Podstawy energetyki cieplnej. WN PWN, Warszawa 1998.
- 78. Szargut J.: Graniczny błąd pomiaru i metoda różniczki zupełnej. Pom. Aut. Kontr., 2, 1999, 3-4.
- 79. Szlęk A.: Eksperymentalno-teoretyczne badania nad emisją tlenku azotu podczas spalania oleju. Praca doktorska, Pol. Śl., Gliwice 1994.
- 80. Thring M.W.: The science of flame and furnace. Chapman and Hall, London 1962.
- Tomeczek J., Bialik W.: Wpływ parametrów substratów na emisję tlenków azotu podczas spalania paliw ciekłych. XVII Zjazd Termodyn. KTiS PAN, Kraków-Zakopane 1999.
- Viscanta R., Menguč M.P.: Radiation heat transfer in combustion systems. Progr. in Energy and Comb. Sc., Vol.13, 1987, 97-160.
- Ward P., Collings N., Hay N.: A comparison of two alternative methods for a burning fuel spray and an assessment of the effect of inter-phase slip. 19-th Symp. (Intern.) on Comb., The Comb. Insit., 1982, 953-959.
- Weissman M., Benson S.W.: Mechanism of soot initiation in methane systems. Progr. in Energy and Comb. Sc., Vol.15, 1989, 273-285.
- 85. Westbrook C.K.: Three dimensional numerical modelling of liquid fuel sprays. 16-th Symp. (Intern.) on Comb., The Comb. Inst., 1976, 593-604.
- Wilk K.: Badania dyfuzyjnych palników gazowych. Zesz. Nauk. Pol. Sl. Energetyka z.85, 1984.
- Wilk R., Szlęk A., Piątek R., Zieliński Z.: Badania szkodliwości spalin z palenisk olejowych małej mocy. XVII Zjazd Termodynamików, KTiS PAN, Kraków-Zakopane 1999.
- Wilk R., Szlęk A., Piątek R., Zieliński Z.: Wpływ warunków spalania oleju opałowego lekkiego na emisję substancji toksycznych w paleniskach małej mocy. Arch. Ochr. Środ. 25, 2, 1999, 45-60.
- Wilk R., Szlęk A., Zajdel A., Zieliński Z.: Obniżenie emisji tlenków azotu oraz wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych podczas spalania oleju. Konf. nt. Niskociśnieniowe techniki spalania, Polski Komit. Bad. Płomieni, Ustroń 1996.
- Wilk R., Szlęk A., Zieliński Z.: Ograniczenie emisji tlenków azotu i wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych podczas spalania oleju. Zesz. Nauk. Pol. Śl. Energetyka z.125, 1995, 283-300.
- Wilk R., Szlęk A.: NO<sub>x</sub> formation and destruction during fuel oil combustion. 2-nd Intern. Conf. on Comb. Techn. For a Clean Envir., Lisbon 1993.
- 92. Wilk R., Szlęk A.: Wpływ mikrostruktury strugi kropel na zmniejszenie emisji NO<sub>x</sub> przy spalaniu oleju. Arch. Ochr. Środ., 23, 3-4, 1997, 31-45.
- 93. Wilk R., Zajdel A., Nadziakiewicz J., Zieliński Z.: Badanie wpływu parametrów substratów na zapłon strugi paliwa płynnego oraz charakterystyki płomieni olejowych. Badanie wpływu własności radiacyjnych płomienia na przenoszenie energii drogą promieniowania. Praca n.b. CPBP 02.18., ITC Pol. Śl., Gliwice 1989.
- 94. Williams A.: Combustion of liquid fuel sprays. Butterworths, London 1990.
- 95. Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik. Główny Urząd Miar 1999.

- Yule A.J., Bolado R.: Fuel spray burning regime and initial conditions. Comb. and Flame, 55, 1984, 1-12.
- 97. Zajdel A.: Analiza rozkładu koncentracji sadzy w płomieniu. Praca n.b. BK-60/RIE-6/94, ITC Pol. Śl., Gliwice 1994.
- Zajdel A.: Analiza wpływu koncentracji sadzy na parametry radiacyjne płomienia olejowego. Praca n.b. BK-290/RIE-6/95, ITC Pol. Śl., Gliwice 1995.
- 99. Zajdel A.: Badania nad doskonaleniem techniki pomiaru koncentracji sadzy w płomieniu. Praca n.b. BK-268/RIE-6/98, ITC Pol. Śl., Gliwice 1998.
- 100.Zajdel A.: Possible cases of oil flames from burners with air-blast atomizers. XIII Intern. Symp. on Comb. Proc., KTiS PAN, Kraków 1993.
- 101.Zajdel A.: Stabilność płomienia olejowego. Zesz. Nauk. Pol. Śl. Energetyka z.111,1990, 21-29.
- 102.Zajdel A.: Temperatura dyfuzyjnego płomienia gazowego i olejowego. Zesz. Nauk. Pol. Śl. Energetyka z.117, 1993, 49-61.
- 103.Zajdel A.: Wpływ konstrukcji olejowego palnika gazodynamicznego na parametry płomienia. XV Zjazd Termodynamików, Pol. Śl., Gliwice-Kokotek 1993.
- 104.Zajdel A., Kochel Z., Zieliński Z.: Opracowanie możliwości prowadzenia procesów rozpylania i stabilizacji spalania w kotłach SR-403 Elektrowni Siersza z wykorzystaniem niskociśnieniowych palników mazutowych o rozpylaniu parowym lub powietrznym. Praca bad.-wdroż. ITC Pol. Śl., Gliwice 1989.
- 105.Zajdel A., Kochel Z., Zieliński Z.: Opracowanie możliwości wspomagania rozpyłania mazutu parą w palnikach ciśnieniowych w kotłach EC Kraków-Łęg. Praca n.b. ITC Pol. Śl., Gliwice 1989-1990.
- 106.Zajdel A., Kochel Z., Zieliński Z.: Zastosowanie palników mazutowych o wspomagającym rozpylaniu parowym w kotłach Elektrowni Rybnik. Praca wdroż. ITC Pol. Śl., Gliwice 1989.
- 107.Zajdel A., Skorek J.: Investigation on thermal effects of spray combustion for various atomization parameters. Semin. nt.. Metody pomiarowe w procesach i systemach energetycznych, TEMPUS SJEP-07397-94, Gliwice-Niedzica 1996.
- 108.Zajdel A., Skorek J.: Ocena wpływu parametrów rozpylania na zużycie paliwa ciekłego w procesie nagrzewania ciała stałego w komorze pieca. XVIII Zjazd Termodynamików, KTIS PAN, Kraków-Zakopane 1999.
- 109.Zajdel A., Wilk R., Błaszczyk J., Zieliński Z., Kochel J., Walawski J.: Strumieniowy, niskociśnieniowy palnik do spalania oleju opałowego. Wz. Użytk. Nr 45860, UP PRL 28.09.1989.
- 110.Zajdel A., Wilk R., Zieliński Z., Kochel Z.: Opracowanie palnika mazutowego o wspomagającym rozpylaniu parowym dla potrzeb rozpalania i stabilizacji spalania w kotłach Elektrowni Łaziska. Praca n.b. ITC Pol. Śl.- ZPBE Energopomiar, Gliwice 1987.
- 111.Zajdel A., Zieliński Z., Kochel Z.: Nowe konstrukcje olejowych palników gazodynamicznych. II Symp. PTMTS "Zagadnienia Energetyczne w Mechanice", Szczyrk 1989.
- 112.Zieliński Z., Kochel Z., Zajdel A.: Urządzenie do spalania ciężkich paliw ciekłych. Patent nr 155874, UP RP 31.01. 1992.

# BADANIA WŁASNOŚCI ORAZ PARAMETRÓW PŁOMIENIA PODCZAS SPALANIA LEKKIEGO OLEJU OPAŁOWEGO

#### Streszczenie

W pracy przedstawiono rezultaty badań spalania paliwa ciekłego prowadzonych w laboratoryjnej komorze przy zastosowaniu różnych rozpylaczy. Uzyskane wyniki pomiarów i wyznaczone zależności pozwalają na lepsze poznanie przebiegu procesów decydujących o parametrach uzyskiwanych płomieni olejowych.

Używano trzech rozpylaczy: jednego ciśnieniowego oraz dwóch rozwiązań rozpylaczy dwuczynnikowych. Badano podstawowe parametry płomieni olejowych, takie jak: temperatura, rozmiary, emisyjność i koncentracja sadzy.

Badania wykazały, że dla różnych typów i konstrukcji rozpylaczy charakter wpływu parametrów substratów spalania na parametry uzyskiwanych płomieni może być istotnie różny, gdyż różnie przebiegają procesy rozpylania i spalania.

W badaniach główną uwagę poświęcono energetycznym efektom spalania paliwa ciekłego, takim jak: temperatura płomienia, temperatura spalin, temperatura ścian, strumienie ciepła radiacyjnego. Przeanalizowano możliwości wpływu na wartość tych parametrów.

Przeprowadzono obliczenia radiacyjnej wymiany ciepła w komorze spalania oraz radiacyjnych parametrów płomieni. Stwierdzono, że na intensywność radiacyjnej wymiany ciepła oraz na skuteczność przekazywania tą drogą energii w obrębie komory spalania bardzo duży wpływ ma promieniowanie płomienia olejowego.

Badania pokazały, że na promieniowanie płomienia olejowego można istotnie wpływać za pomocą parametrów rozpylania paliwa oraz parametrów powietrza do spalania. Wynika stąd potrzeba optymalizacji parametrów spalania paliwa ciekłego pod kątem intensyfikacji promieniowania płomienia. W zakresie prowadzonych badań uzyskano, poprzez dobór parametrów rozpylania lub parametrów powietrza do spalania, efekty energetyczne na poziomie kilkunastu %. W przypadkach stanów nieustalonych, w czasie rozgrzewania komory spalania, efekty były wyższe i sięgały poziomu 30%.

Badania wykazały, że podwyższanie emisji promieniowania płomienia olejowego następuje w rezultacie takich zmian parametrów substratów spalania, które prowadzą do wzrostu emisyjności oraz rozmiarów płomienia, a nie do wzrostu temperatury płomienia. Zmiany temperatury mają z reguły kierunek przeciwny i są znacznie mniejsze procentowo aniżeli towarzyszące im zmiany emisyjności i rozmiarów płomienia i dlatego właśnie te ostatnie decydują o ilości ciepła wypromieniowywanego przez płomień.

W pracy przeprowadzono również badania emisyjności płomieni olejowych w aspekcie uszczegółowienia danych dotyczących wzoru na emisyjność zawiesiny sadzy w gazie. Określono zakres wartości stałej reprezentującej własności optyczne sadzy oraz postać jej zależności od temperatury gazu.

W oparciu o wyniki badań przy użyciu rozpylacza dwuczynnikowego opracowano zależności empiryczne pomiędzy podstawowymi parametrami płomienia olejowego a głównymi parametrami spalania. Mogą być one pomocne w pracach projektowych komór spalania opalanych paliwami ciekłymi.

### INVESTIGATIONS OF FLAME PROPERTIES AND FLAME PARAMETERS DURING COMBUSTION OF LIGHT FUEL OIL

#### Abstract

The paper presents results of investigations of combustion of liquid fuel which were performed in a laboratory chamber with use of different types of atomizers. Measurement results and found dependences let to develop understanding of occuring processes and their relationship with parameters of oil flames obtained.

Three atomizers were used: one of pressure type and two different designs of twin fluid type. Main parameters of oil flames like: temperature, sizes, emissivity and soot concentration were examined.

Investigations showed that for different types and different designs of atomizers parameters of combustion substrates can influence on parameters of flames in a significantly different manner. The reason lays in atomization and combustion processes which occur differently for different designs of atomizers.

Investigations were focused on such thermal effects of combustion of oil fuel as: flame temperature, temperature of flue gases, temperature of walls of chamber, fluxes of radiative heat. It was tested how far, in practical conditions, one can influence on values of these parameters.

Calculations of radiative heat exchange inside combustion chamber and radiative parameters of flame were curried out. It was found that radiation of oil flame significantly influences intensity of radiative heat exchange and efficiency of energy transfer inside combustion chamber.

Investigations showed that by means of parameters of atomization process as well as parameters of air one can essentially affect oil flame radiation. Therefore, it can state that intensity of flame radiation should be treated as a criterion, one of the others, which ought to be taken into account when parameters of liquid fuel combustion process are selected. In a scope of performed tests energy effects, gained by a choice of atomization parameters, were on level of 12% in the thermal steady state of combustion chamber and on level 30% in the transient state, during heating of chamber.

Investigations indicated that increase of emission of oil flame radiation takes place when the change of parameters of combustion substrates leads to growth of flame sizes and flame emissivity but not necessarily to growth of flame temperature. As a rule is that direction of changes of temperature of oil flame is opposite to direction of accompanied changes of flame sizes and flame emissivity. Because changes of flame temperature are relatively considerable smaller than changes of sizes and emissivity so these late are decided for emission of radiation by flame.

Simultaneous investigations of different oil flame parameters like: temperature, sizes, emissivity and soot concentration give data, which let to verify the dependence applied for calculation of emissivity of soot in gas suspension. The range of values of constant representing optical properties of soot, being adequate for cases of light oil combustion, as well as the dependence between that constant and gas temperature were determined.

On base of results of tests obtained in use of twin fluid atomizer the empirical dependences between main parameters of oil flame and main combustion parameters were elaborated. Received dependences can be helpful in design of combustion chambers fired by liquid fuels.

BIBLIOTEKA GŁÓWNA Politechniki Śląskiej 2 Druk: Drukarnia Gliwice, ul. Zwycięstwa 27, tel. 230 49 50