

Antoni ZAJDEL

Politechnika Śląska, Gliwice

TEMPERATURA DYFUZYJNEGO PŁOMIENIA GAZOWEGO I OLEJOWEGO

Streszczenie. Opierając się na przeprowadzonych pomiarach laboratoryjnych wykazano, że wpływ parametrów powietrza doprowadzonego do wylotu palnika na uzyskiwane temperatury w płomieniu jest różny dla różnych rodzajów paliw. Zaprezentowano wyniki pomiarów temperatury w płomieniach przy spalaniu gazu miejskiego i oleju napędowego. Stwierdzono m.in., że wzrost prędkości wpływu powietrza z palnika powoduje wzrost temperatury w przypadku płomienia gazowego, natomiast jej obniżanie w płomieniu olejowym.

TEMPERATURE OF OIL AND GAS DIFFUSION FLAMES

Summary. On the base of the laboratory measurements carried out for different kinds of fuels, various influence of the air parameters in burner outlet on flames temperatures was indicated. Results of flames temperatures measurements for burning of town-gas and Diesel oil are presented. It was found, among others, that increase of air outlet velocity from burner caused flame temperature rise in a case of gas flame but temperature drop in oil flame.

DIE TEMPERATUR EINER DIFFUSES GAS - UND ÖLFLAMME

Zusammenfassung. Es wurde mit Hilfe der durchgeführten Laboruntersuchungen gezeigt, daß die Parameter der an die Brennermündung zugeführten Luft, einen, für verschiedene Brennstoffe unterschiedlichen, Einfluß auf die erzeugte Flammentemperatur ausüben. In dem Beitrag wurden die Ergebnisse der gemessenen Flammentemperatur, bei der Stadtgas - und Dieselölverbrennung dargestellt. Es wurde zw. an. festgestellt, daß die Erhöhung der Luftausflußgeschwindigkeit aus dem Brenner, bei der Gasverbrennung eine Flammentemperaturerhöhung, jedoch bei der Dieselölverbrennung eine Temperaturerniedrigung verursacht.

1. WSTĘP

Temperatura płomienia jest jednym z najistotniejszych parametrów świadczących o jakości przebiegu procesu spalania paliwa. Zazwyczaj, w przeciętnych warunkach przemysłowych, chodzi o uzyskanie możliwie najwyższej temperatury w płomieniu, gdyż wówczas płomień bardziej skutecznie realizuje swoje podstawowe zadanie przekazywania ciepła nagrzewanemu obiektowi.

Proces spalania paliw gazowych oraz analiza płomienia gazowego były przedmiotem wielu badań i istnieje obszerna literatura dotycząca tego problemu [4,5,6,7,8]. Wiedza w tym zakresie jest uporządkowana, a zjawisko dobrze rozpoznane. Wiadomo jest zatem, że w gazowych płomieniach dyfuzyjnych uzyskuje się tym wyższą temperaturę, im lepiej jest zorganizowane mieszanie paliwa z powietrzem na wypływie z palnika. Praktycznie oznacza to, że wyższe temperatury w płomieniu gazowym uzyskuje się przy większej turbulencji strugi, a zatem dla większych prędkości wypływu powietrza z palnika. W pracy przedstawione są wyniki badań laboratoryjnych, które potwierdzają istnienie wspomnianych wyżej prawidłowości.

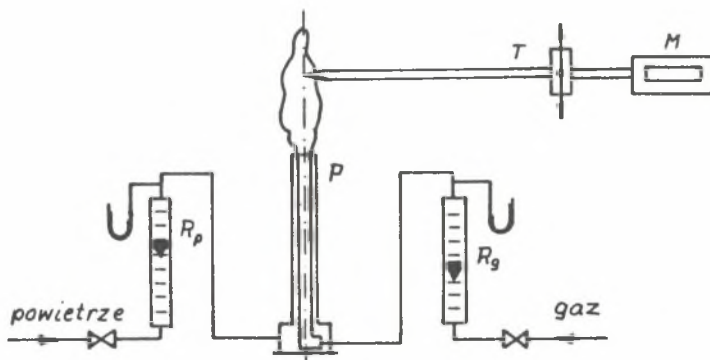
W przypadku spalania paliwa ciekłego nie można w sposób jednoznaczny rozstrzygnąć problemu poziomu i rozkładu temperatury w uzyskiwanym płomieniu. Wynika to przede wszystkim z ogromnej różnorodności możliwych wariantów płomieni, uwarunkowanej zarówno różnorodnością własności hydrodynamicznych spalanych paliw, jak i stosowanych sposobów rozpylania tych paliw. Zagadnienie spalania paliw ciekłych w postaci rozpylonej strugi zostało w sposób ogólny przedstawione w różnych monografiach dotyczących spalania, dla przykładu [2,3,9]. W większości płomienie olejowe w różnych komorach spalania są płomieniami dyfuzyjnymi. Na sposób kinetyczno-dyfuzyjny spalane są jedynie bardzo lekkie paliwa ciekłe, jak benzyna czy nafta. W pracy przedmiotem rozważań są dyfuzyjne płomienie olejowe uzyskiwane na stanowiskach laboratoryjnych przy zastosowaniu ciśnieniowego sposobu rozpylania.

W trakcie badań nad strumieniami ciepła przejmowanymi od płomieni olejowych zaobserwowano nieoczekiwaną prawidłowość obniżenia temperatury w płomieniach o zwiększonej dynamice wypływu powietrza z palnika. Był to więc efekt zgoła odmienny od uzyskiwanego przy spalaniu paliwa gazowego. Dla potwierdzenia trafności poczynionych obserwacji odnośnie do odmiennego wpływu parametrów doprowadzonego powietrza na charakterystyki temperaturowe dyfuzyjnych płomieni olejowych i gazowych przeprowadzono odpowiednie pomiary temperatur takich płomieni w warunkach laboratoryjnych. Dla obu rodzajów paliw stworzono podobne warunki rozprzestrzeniania się ich płomieni. Spalanie realizowano w

otwartej przestrzeni, przy takiej samej temperaturze otoczenia, płomień skierowane były pionowo ku górze, a powietrza do spalania nie zawirowywało.

2. TEMPERATURA W PŁOMIENIU GAZOWYM

Za pomocą prostego zestawu laboratoryjnego, pokazanego schematycznie na rys.1, spalano gaz koksowniczy w otwartym, pionowym płomieniu. Palnik składał się z dwóch koncentrycznych rurek, przy czym wewnętrzna stanowiła przewód gazowy, a zewnętrzna - powietrzny. Zarówno powietrze jak i gaz były niezawierane. Pomiary przeprowadzono dla dwóch różnych strumieni gazu $V_g = 0,3 \text{ m}^3/\text{h}$ oraz $0,45 \text{ m}^3/\text{h}$. Dla każdego z tych strumieni wykonano pomiary rozkładu



Rys.1. Schemat instalacji do pomiaru temperatury w płomieniu gazowym:

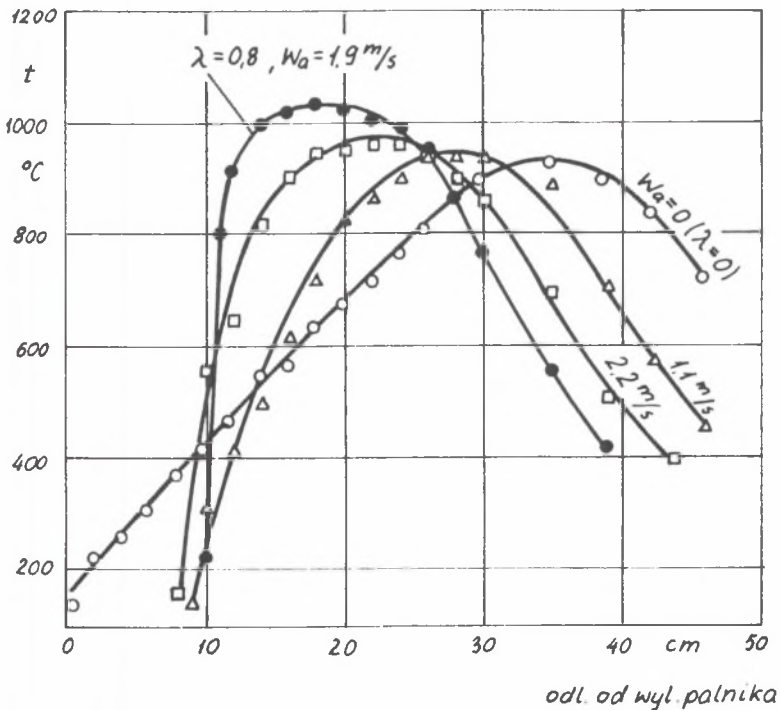
P-palnik, R_p , R_g -rotametry, T-termopara PtRh-Pt, M-miernik temperatury

Fig.1. Scheme of installation for gas flame temperature measurement:

P-burner, R_p , R_g -rotameters, T-PtRh-Pt thermocouple, M-temperature meter

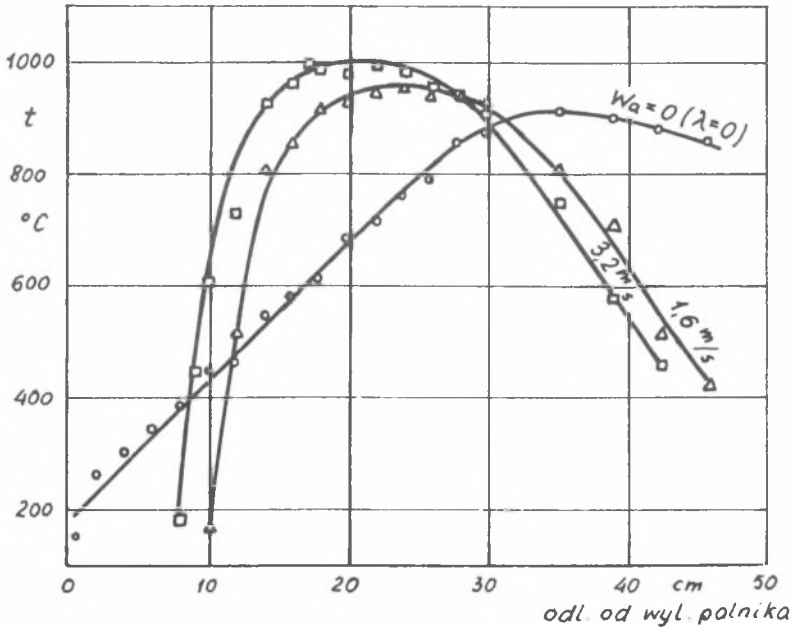
temperatury w osi płomienia przy trzech różnych wariantach parametrów powietrza doprowadzonego do wylotu palnika. Pierwszy dotyczył sytuacji, gdy dopływ powietrza był odcięty ($\lambda = 0$) i z palnika wypływał tylko strumień gazu. Płomień w tym przypadku był mało dynamiczny, a powietrze do spalania samoczynnie dopływało z otoczenia. W drugim i trzecim przypadku powietrze doprowadzono w identycznych ilościach, odpowiadających stosunkowi nadmiaru $\lambda = 0,45$, lecz z różnymi prędkościami wypływu. Wartość stosunku λ ustalono na

poziomie zapewniającym stabilny płomień. Przy dalszym zwiększeniu stosunku λ , wobec braku stabilizatora, płomień tracił stabilność. Jednak wartość tego stosunku przy porównawczym charakterze niniejszych badań nie ma większego znaczenia. Badania wykazały, że charakter analizowanych prawidłowości nie zależy od wartości stosunku nadmiaru powietrza. Natomiast, aby zaobserwowane oddziaływania miały jednoznaczny sens, istotne jest, by stosunek ten był jednakowy dla porównywanych płomieni.



Rys. 2. Temperatura w osi płomienia gazowego dla $V_g = 0,3 \text{ m}^3/\text{h}$ oraz $\lambda = 0,45$ przy różnej prędkości wypływu w_a powietrza g

Fig. 2. Temperature in gas flame axis for different values of air outlet velocity w_a when $V_g = 0,3 \text{ m}^3/\text{h}$ and $\lambda = 0,45$



Rys.3. Temperatura w osi płomienia gazowego dla $V_g = 0,45 \text{ m}_n^3/\text{h}$ oraz $\lambda = 0,45$ przy różnej prędkości wypływu w_a powietrza^g

Fig.3. Temperature in gas flame axis for different values of air outlet velocity w_a when $V_g = 0,45 \text{ m}_n^3/\text{h}$ and $\lambda = 0,45$

Na rys.2 i 3 przedstawiono zmierzone osiowe rozkłady temperatur w trzech omówionych wyżej przypadkach płomieni gazu koksowniczego. Dla strumienia gazu $V_g = 0,3 \text{ m}_n^3/\text{h}$ (rys.2) były to prędkości wypływu powietrza $w_a = 0$; 1,1 i 2,2 m/s, natomiast dla $V_g = 0,45 \text{ m}_n^3/\text{h}$ (rys.3) prędkości $w_a = 0$; 1,6 i 3,2 m/s. Dodatkowo dla strumienia gazu $V_g = 0,3 \text{ m}_n^3/\text{h}$ pokazano rozkład temperatury dla większego stosunku $\lambda = 0,8$. Zaprezentowano wyniki uzyskane przy dwóch różnych obciążeniach cieplnych palnika, aby wykazać niezależność wpływów jakościowych od tego czynnika. Występują natomiast w obu przypadkach pewne zrozumiałe różnice ilościowe.

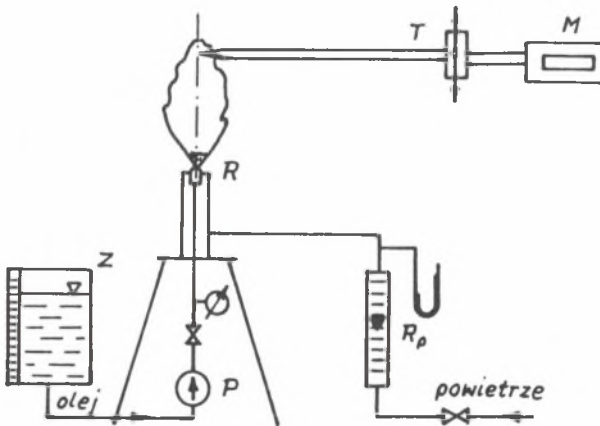
Widać zatem, że zwiększenie prędkości wypływu powietrza z palnika gazowego powoduje zdynamizowanie procesu spalania, którego efektem jest wzrost tempe-

ratur i skrócenie płomienia. Efekty te są wyraźniej widoczne przy wyższych prędkościach wypływu ($V_g = 0,45 \text{ m}^3/\text{h}$). Wzrost stosunku nadmiaru powietrza (w zakresie $\lambda < 1$) powoduje, przy porównywalnej prędkości wypływu powietrza z palnika (rys.2: krzywe $\lambda = 0,8$; $w_a = 1,9 \text{ m/s}$ oraz $\lambda = 0,45$; $w_a = 2,2 \text{ m/s}$), istotny wzrost poziomu temperatur w płomieniu.

Pomiary temperatury dokonano za pomocą termopary PtRh-Pt z odsłoniętą spoiną. Przedstawione rezultaty reprezentują temperaturę spoiny. Wartość odchyłki pomiarowej spowodowanej promieniowaniem spoiny jest proporcjonalna do poziomu temperatury i nie zmienia zależności jakościowych. Ponieważ precyzyjne określenie tej odchyłki jest kłopotliwe, postanowiono nie uwzględniać jej w niniejszych badaniach.

3. TEMPERATURA W PŁOMIENIU OLEJOWYM

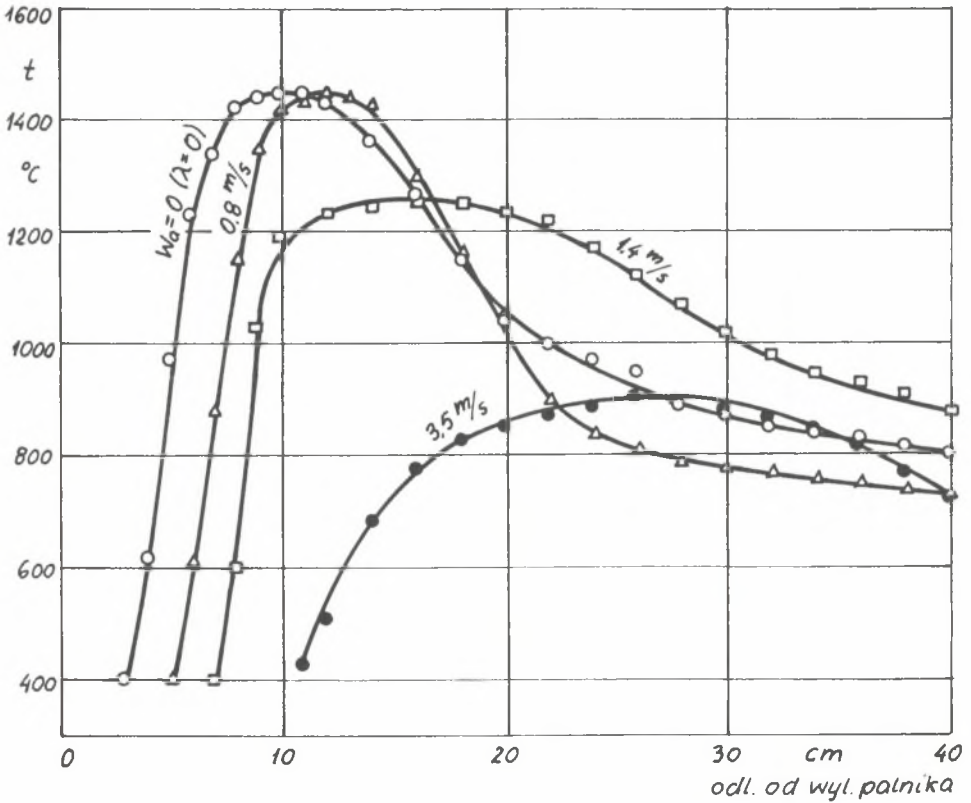
Pomiary temperatury w płomieniu olejowym przeprowadzono na stanowisku pokazanym na rys.4. Stosując rozpylanie ciśnieniowe spalano olej napędowy



Rys. 4. Schemat instalacji do pomiaru temperatury w płomieniu olejowym:
R-rozpylacz, P-pompa zębata, Z-zbiornik, R-rotametr, T-termopara PtRh-Pt, M-miernik temperatury

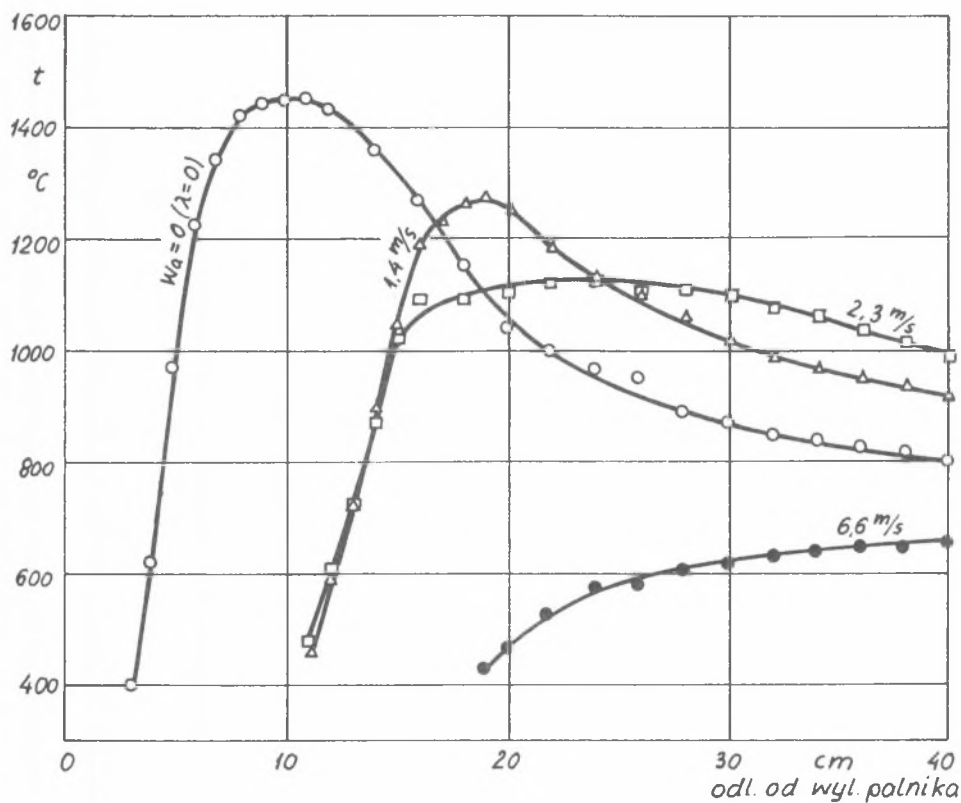
Fig. 4. Scheme of installation for oil flame temperature measurement:
R-atomizer, P-gear pump, Z-fuel tank, R-rotametr, T - PtRh-Pt thermocouple, M-temperature meter

w pionowym płomieniu ze stałą wydajnością $m_p = 2,1$ kg/h. Na rys.5 i 6 przedstawiono zmierzone osiowe rozkłady temperatur w płomieniach olejowych przy dwóch stosunkach nadmiaru powietrza $\lambda = 0,45$ i $0,80$. Poszczególne krzywe na wykresach dotyczą płomieni uzyskiwanych przy różnych prędkościach wypływu powietrza z palnika. W przypadku $\lambda = 0,45$ (rys.5) są to prędkości $w_a = 0; 0,8; 1,4$ i $3,5$ m/s, natomiast dla $\lambda = 0,80$ (rys.6) - $w_a = 0; 1,4; 2,3$ i $6,6$ m/s.



Rys.5. Temperatura w osi płomienia olejowego dla $\lambda = 0,45$ przy różnych prędkościach w_a wypływu powietrza

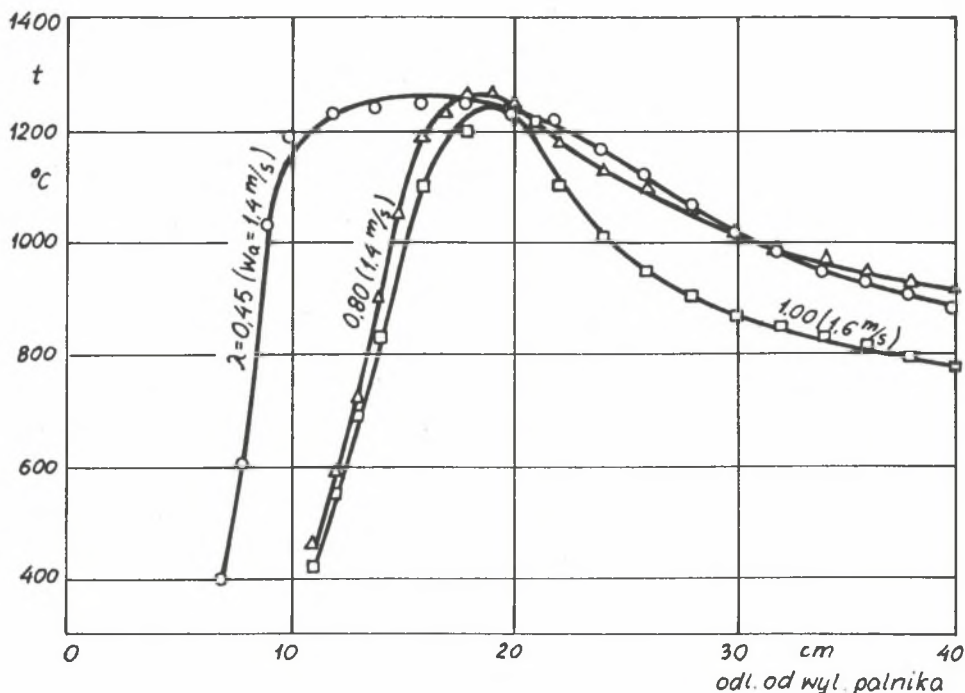
Fig.5. Temperature in oil flame axis for $\lambda = 0,45$ and different values of air outlet velocity w_a



Rys. 6. Temperatura w osi płomienia olejowego dla $\lambda = 0,80$ przy różnych prędkościach w_a wypływu powietrza

Fig. 6. Temperature in oil flame axis for $\lambda = 0,80$ and different values of air outlet velocity w_a

Strumień powietrza był niezawierowany. Wariant $w_a = 0 \text{ m/s}$ pokazany na obu rysunkach oznacza brak wymuszonego dopływu powietrza, a zatem $\lambda = 0$. Umieszczono go w zestawieniach z innymi płomieniami po to, aby, podobnie jak to było w przypadku płomieni gazowych, umożliwić bezpośrednie porównanie tego potencjalnie najgorszego wariantu płomienia z płomieniami o regulowanym dopływie powietrza. Z przebiegu krzywych na obu rysunkach wyraźnie widać, że wzrost prędkości wypływu powietrza z palnika spowodował obniżenie poziomu temperatur w płomieniach olejowych i często ich dość znaczne odsunięcie od wylotu palnika. Są to więc rezultaty niemal dokładnie odwrotne od uzyskanych dla paliwa gazowego.



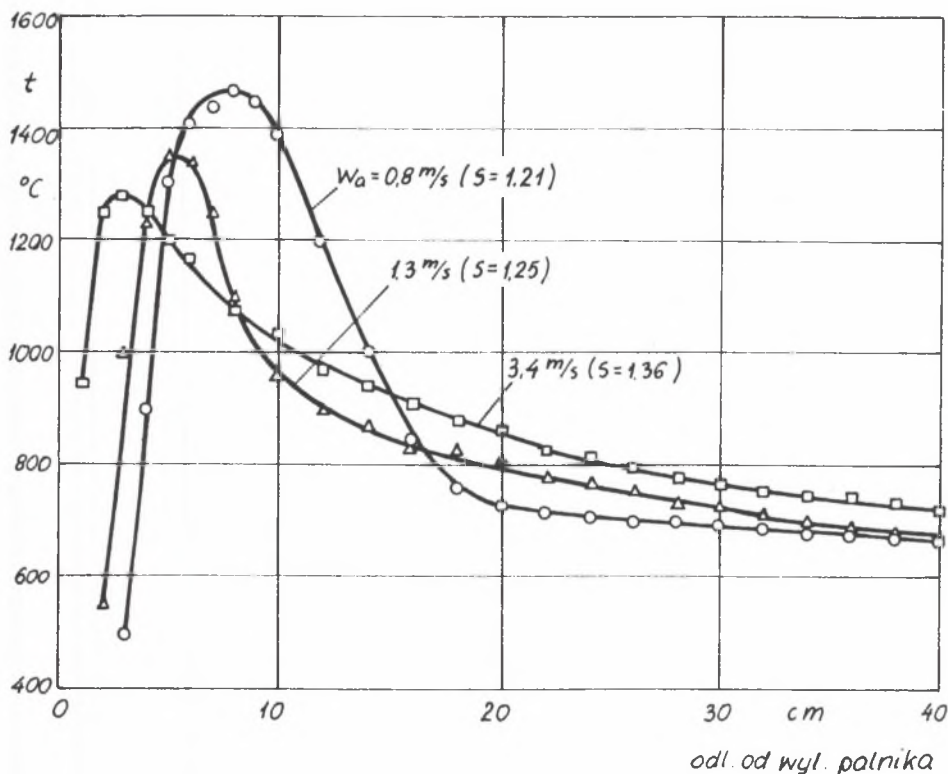
Rys.7. Temperatura w osi płomienia olejowego przy różnych stosunkach λ nadmiaru powietrza

Fig.7. Temperature in oil flame axis for different values of air excess ratio λ

Na rys.7 zestawiono płomienie o różnych wartościach stosunku nadmiaru powietrza λ : 0,45, 0,80 i 1,00 przy identycznych bądź porównywalnych prędkościach wypływu powietrza z palnika. Widać, że wzrost stosunku λ nie przyczynia się do wzrostu poziomu temperatur w płomieniu, a obszar występowania wysokich temperatur wyraźnie się zmniejsza. I w tym więc aspekcie wpływ parametrów powietrza jest odmienny niż przy spalaniu gazu.

W rzeczywistych palnikach dyfuzyjnych, zwłaszcza olejowych, powietrze doprowadzane do wylotu palnika jest zawirowywane. Głównym celem stosowania zawirowywacza jest zintensyfikowanie procesu dyfuzji oraz stabilizacja płomienia. W przedstawionych wyżej badaniach powietrza nie zawirowywano, aby stworzyć podobne warunki dla płomieni gazowych i olejowych. Przy zastosowaniu zawirowywania powietrza byłoby to utrudnione. Aby jednak sprawdzić, czy zawirow-

wanie powietrza jakościowo nie zmieni wykazanych wyżej wpływów, przeprowadzono pomiary temperatur w płomieniach olejowych z powietrzem przepływającym przez odpowiedni zawirowywacz łopatkowy. Na rys.8 zaprezentowano wyniki pomiarów rozkładów temperatur w trzech płomieniach o stałej ilości powietrza do



Rys. 8. Temperatura w osi płomienia olejowego w przypadku zawirowania powietrza do spalania przy $\lambda = 0,45$ oraz różnych prędkościach w_a wypływu tego powietrza

Fig. 8. Temperature in oil flame axis in case of swirl of combustion air for $\lambda = 0,45$ and different values of air outlet velocity w_a

spalania ($\lambda = 0,45$) oraz różnych prędkościach jego wypływu $w_a = 0,8; 1,3$ i $3,4 \text{ m/s}$ (zakres prędkości jest tu podobny jak dla płomieni pokazanych na rys.5). Powietrze przepływało przez zawirowywacz, którego łopatki nachylone były pod kątem 60° do powierzchni przechodzącej przez oś rozpylacza oleju.

Odpowiada to stopniowi zawirowania powietrza, określoneemu zgodnie z [1], w granicach od $S = 1,21$ dla $w_a = 0,8$ m/s do $S = 1,36$ dla $w_a = 3,4$ m/s. Stopień zawirowania S oblicza się według wzoru:

$$S = \frac{M}{K R},$$

gdzie: M - moment pędu strugi zawirowanej względem osi,

K - pęd strugi,

R - promień wypływu

Zawirowanie powietrza spowodowało przede wszystkim przybliżenie strefy najintensywniejszego spalania do wylotu palnika. Jest to zrozumiały skutek szybszego tworzenia mieszanki palnej i poprawy stabilności płomienia. Widać jednak także, że charakter prawidłowości zaobserwowanej we wcześniej prezentowanych płomieniach nie uległ zmianie. Poziom zmierzonych temperatur nadal jest wyższy dla mniejszych prędkości wypływu powietrza. Oznacza to, że istotniejszy dla poziomu temperatur jest stopień burzliwości przepływu powietrza niż stopień jego zawirowania, aczkolwiek porównując płomienie z zawirowanym i niezawirowanym powietrzem widać - zwłaszcza przy wyższych prędkościach - wzrost temperatur maksymalnych dla przypadków z zawirowanym powietrzem.

Pomiaru temperatury w płomieniach olejowych dokonano w sposób podobny jak w płomieniach gazowych.

4. ANALIZA UZYSKANYCH REZULTATÓW

Przeprowadzone pomiary wykazały ściśle uzależnienie intensywności przebiegu procesu spalania paliwa gazowego, której miarą jest temperatura płomienia, od szybkości tworzenia mieszanki palnej oraz stopnia stechiometryczności składu tworzonej mieszanki. Wyższe prędkości wypływu powietrza z palnika przy stałej ilości tego powietrza oznaczają większą turbulencję strugi, a zatem szybsze mieszanie paliwa gazowego z powietrzem. Efektem tego jest wyższa temperatura w płomieniu. Zbliżenie składu powstającej mieszanki palnej do proporcji stechiometrycznych także sprzyja wzrostowi temperatury. Efekty powyższe zaobserwowano przy dwóch różnych wydajnościach palnika oraz różnych wartościach prędkości wypływu powietrza z palnika.

Odmienne jest przebieg zjawisk w płomieniu olejowym. Wzrost turbulencji strugi powietrza nie poprawia intensywności reakcji spalania paliwa ciekłego, a wręcz ją pogarsza. Prawidłowość tę autor zaobserwował także przy prowadzeniu innych badań, z innymi paliwami - np. naftą - i w innych układach płomie-

ni. Najbardziej prawdopodobną przyczyną takiej sytuacji jest pogorszenie warunków parowania kropeł rozpylonego paliwa, a być może także obniżenie jakości rozpylania. Wprowadzenie zimnego powietrza w obszar podgrzewania i odparowania kropeł paliwa powoduje spowolnienie tych procesów. Dynamicznie dyfundujące w strefę reakcji chemicznej zimne powietrze nie przyspiesza więc procesu tworzenia mieszanki palnej, ponieważ w obszarze tym brakuje odparowanego paliwa. Wzrost ilości powietrza i zbliżenie się do proporcji stechiometrycznej nie może więc poprawić warunków spalania. Widać to z przebiegu temperatur pokazanych na rys. 7.

Pewną zmianę warunków spalania w płomieniu olejowym wywołuje zawirowanie powietrza. Powstające w takim przypadku strefy recyrkulacji wydłużają czas przebywania utleniacza w obszarze parowania paliwa, co doprowadza w rezultacie do intensyfikacji przebiegu reakcji spalania i zmiany profilu rozkładu temperatury w płomieniu. Nie powoduje to jednak jakościowej zmiany - w porównaniu do przepływu niezawirowanego - oddziaływania prędkości wypływu powietrza na temperaturę płomienia. I w takim przypadku przy wyższych prędkościach wypływu powietrza z palnika uzyskiwane są niższe temperatury w płomieniu.

Powyższe badania prowadzą do ogólnego wniosku, że spalanie paliwa ciekłego winno być realizowane w niezbyt dynamicznych płomieniach. Poprawę dynamiki płomienia, niezbędną w niektórych rodzajach komór spalania, winno się uzyskiwać przez stosowanie rozpylania gazodynamicznego (pneumatycznego) z wykorzystaniem pary przegrzanej jako czynnika rozpylającego. Wysoka temperatura czynnika rozpylającego polepsza warunki rozpylania i uzyskiwane płomienie charakteryzują się dobrymi parametrami termicznymi.

LITERATURA

- [1] Beer J.M., Chigier N.A.: Combustion aerodynamics. Appl. Sc. Publ. Ltd., London 1972.
- [2] Chigier N.A.: Energy, combustion and environment. McGraw-Hill, New York 1981.
- [3] Chomiak J.: Combustion: A study in theory, fact and application. Gordon and Breach Sci. Publ., Montreux, Switzerland 1990.
- [4] Fristrom R.M., Westenberg A.A.: Flame structure. McGraw-Hill Inc., 1965.
- [5] Iserrlin A.S.: Modelirowanije processow gorienija gaza i ustojcziwost turbulientych płamien. Arch. Proc.Spal., vol. 4, nr 3, 1973.

- [6] Petela R.: Paliwa i ich spalanie. Cz. I-IV. skrypt Pol. Śl., Gliwice 1978-80.
- [7] Tomeczek J.: Spalanie i płomienie gazowe. Skrypt Pol. Śl., Gliwice 1979.
- [8] Wilk K.: Badania dyfuzyjnych palników gazowych. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Energetyka z. 85, praca habilitacyjna, Gliwice 1984.
- [9] Williams A.: Combustion of sprays and liquid fuels. Elek Sc. Books Ltd., London 1976.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Stanisław Słupek

TEMPERATURE OF OIL AND GAS DIFFUSION FLAMES

A b s t r a c t

On laboratory installations a few series of measurements of temperature distribution in axes of open oil and gas flames were made. Diesel oil and town gas were burnt. Measurements showed that influence of the air parameters in burner outlet on different features of received flames, most of all on flame temperature, was various for both kinds of tested fuels. These parameters are the air outlet velocity and amount of air.

Measurements were carried for two values of gas flow rate $V_g = 0,3$ and $0,45 \frac{m^3}{h}$ and one value of oil flow rate $m_p = 2,1 \text{ kg/h}$. Gas flames were studied for air excess ratio $\lambda = 0; 0,45$ and $0,8$ and air outlet velocity w_a within the range $0+3,2 \text{ m/s}$, Oil flames were studied for air excess ratio $0; 0,45; 0,8$ and $1,0$ and air outlet velocity within the range $0+6,6 \text{ m/s}$.

Within studied range of parameters it was found that increase of air outlet velocity w_a and air excess ratio λ caused flame temperature rise and drawing of the flame front near the burner in case of gas flame but the temperature drop and flame front carrying away in case of oil flame.

Received results were analysed theoretically.