ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1974

Seria: Energetyka z. 50 Nr kol. 402

Jerzy Tomeczek
Jan Góral
Instytut Energetyki Gazowej

# DŁUGOŚĆ PRZEMYSŁOWYCH PŁOMIENI DYFUZYJNYCH GAZU ZIEMNEGO JAKO FUNKCJA PARAMETRÓW WEJŚCIOWYCH

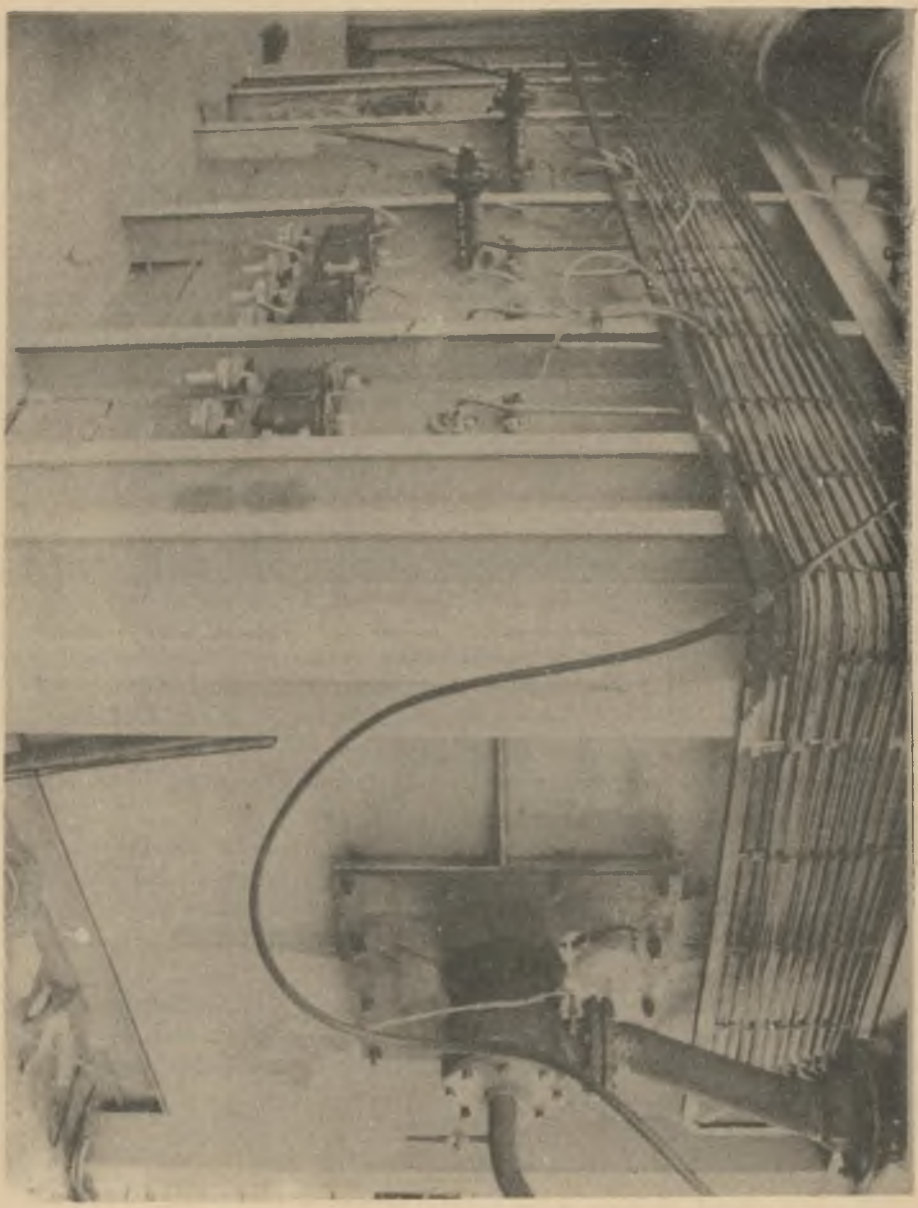
Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych dyfuzyjnego płomienia gazu ziemnego otrzymywanego w palniku z zawirowaniem i bez zawirowania strugi powietrza. Dokonano pomiarów długości płomienia metodą optyczną dla temperatury powietrza 20°C i 200°C. Bezwymiarową długość płomienia przedstawiono w postaci zależności od liczby Reynoldsa dla powietrza i gazu.

## 1. Wstęp

W Laboratorium Spalania Paliw Gazowych Instytutu Energetyki Gazowej przeprowadzono serie badań dużych płomieni gazu ziemnego spalanego w palnikach przemysłowych typu "rura w rurze" [1,2]. Celem tych badań było określenie charakterystyki płomienia. Dokonano zatem pomiarów długości płomienia, rozkładu temperatury i koncentracji składników chemicznych w płomieniu. Analizowano wpływ następujących wielkości na płomień: średnica dyszy paliwowej, przekrój wylotowy strugi powietrza, kąt zawirowania strugi powietrza, temperatura powietrza, nadmiar powietrza w palniku oraz wielkość średnicy wypływu strugi powietrznej.

Maksymalny strumień gazu uzyskany podczas badań wynosił 110 $nm^3/h$, wyniki numeryczne opracowane na załączonych wykresach dotyczą jednak tylko wydajności do 70 $nm^3/h$. Komora spalania umożliwia podgrzanie powietrza do 350°C na wejściu do palnika, dostateczną informację zebrano jedynie dla temperatury powietrza 20°C i 200°C.

Widok ogólny głównej komory spalania przedstawiono na rysunku 1. W odróżnieniu od wyników innych badaczy [3,4,7] rezultaty tej pracy osiągnięto na urządzeniu dużym odpowiadającym skali przemysłowej. Gaz ziemny stosowany w badaniach charakteryzował się dużą zawartością metanu (udział objętościowy metanu ok. 99%).

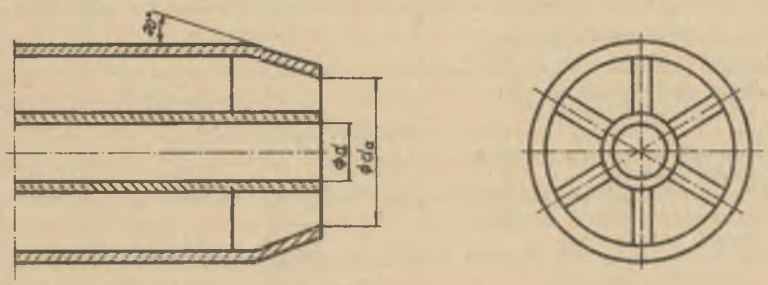


Rys. 1. Ogólny widok komory spalania

## 2. Opis stanowiska badawczego

Palniki umieszczone były w ścianie czołowej komory spalania, która posiada kształt prostopadłościanu o wymiarach wewnętrznych 1 x 1 x 3,1 m. Przebadano kilka palników tego samego typu przedstawionego schematycznie na rysunku 2.

Konstrukcja palnika umożliwiała zmianę jego geometrii wypływowej: średnicy dyszy paliwowej, kąta zawirowania strugi powietrza, przekroju wypływowego strugi powietrza, średnicy strugi wypływowej powietrza.



Rys. 2. Schemat wylotu z palnika

Oprócz geometrii palnika w trakcie eksperymentów zmieniono również: temperaturę powietrza, stosunek nadmiaru powietrza, obciążenie palnika, ciśnienie w komorze spalania. Zakres zmienności badanych parametrów zebrano w tabeli 1. Badania prowadzono przy jednym stabilizatorze szamotowym, przedstawionym na rysunku 3.

Oprzyrządowanie komory spalania stanowił zestaw pięciu sond chłodzonych wodą do poboru próbek spalin oraz ruchoma termopara aspiracyjna. Zestaw ten pozwala na przesondowanie prawie całej objętości komory. Rejestracja pomiarów prowadzona jest centralnie na taśmach.

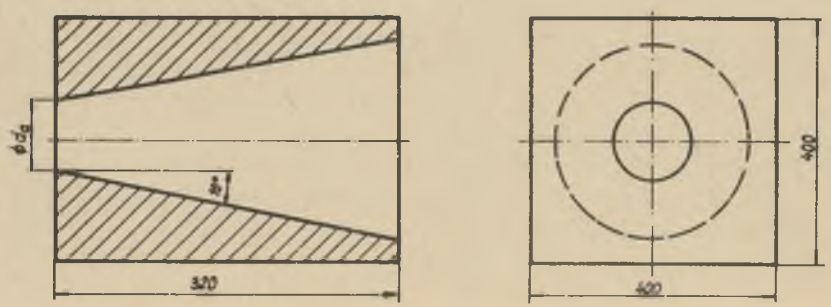
Ciśnienie w komorze regulowane jest ruchomą zasuwą umieszczoną przed kominem o ciągu naturalnym. Podgrzewanie powietrza realizowane jest w rekuperatorze ogrzewanym spalinami z niezależnej komory pomocniczej. Celem takiego rozwiązania było uniezależnienie temperatury powietrza spalania od zmian obciążenia w komorze głównej.

Stacja redukcyjna gazu ziemnego umożliwia otrzymanie ciśnienia gazu przed palnikiem do wartości 400 mm $H_2O$, przy czym istnieje możliwość uzyskania wyższych ciśnień do około 4 bar.

Tabela 1

Zakres zmienności badanych parametrów

| Parametr | Wymiar | Wartość | |
|---|---|---|---|
| | | minimalna | maksymalna |
| $w_g$ - prędkość gazu | $ms^{-1}$ | 3,3 | 62,0 |
| $w_a$ - osiowa prędkość powietrza | $ms^{-1}$ | 6,0 | 72,0 |
| d - średnica dyszy gazowej | m | 0,02 | 0,04 |
| $A_a$ - pole przekroju wypływowego powietrza | $m^2$ | $1,7x10^{-3}$ | $1,4x10^{-2}$ |
| $\alpha$ - kąt zawirowania strugi powietrza | stop. | 0 | 20 |
| $d_a$ - średnica strugi wypływowej powietrza | m | 0,125 | 0,225 |
| $\lambda$ - stosunek nadmiaru powietrza | bezwym. | 0,8 | 1,35 |
| $t_a$ - temperatura powietrza spalania | $^oC$ | 20 | 200 |
| $p_k$ - ciśnienie w przestrzeni komory spalania | mm $H_2O$ | -1,0 | +1,0 |




Rys. 3. Stabilizator szamotowy

## 3. Badanie długości płomienia

Ciśnienie panujące w komorze spalania, jakkolwiek wpływało istotnie na temperaturę płomienia i wypalenie, nie wpływało na długość płomienia. Badane płomienie charakteryzowały się silną turbulencją, co powodowało intensywne pulsacje ich końców. Kształt płomienia uzależniony jest głównie od pędu strugi powietrza oraz w miejszym stopniu gazu. Mały pęd strugi powietrza prowadzi do dużych średnic płomienia o dużej emisyjności, podczas gdy duży pęd strugi powietrza działa przeciwnie, dając dodatkowo dobrze zarysowany koniec płomienia.

Badane były dwa kąty zawirowania strugi powietrza $\alpha = 0^{o}$ i $20^{o}$. Brak zawirowania powietrza daje płomień zwarty o małej emisyjności oraz o dobrze uformowanym końcu. Zawirowanie strugi zaś prowadzi do zwiększenia średnicy płomienia, dużej jego emisyjności (nawet dla $\lambda > 1$) oraz postrzępienia jego końców. Dodatkowym efektem w tym tylko przypadku było duże niewypalenie paliwa przy nadciśnieniach w komorze.

Pomiary prowadzone były przy nagrzaniu obmurza komory do około $800^{o}C$ oraz przy zimnym obmurzu. Nie stwierdzono, w zakresie dokładności pomiaru, wpływu temperatury obmurza na długość płomienia.

Dla małych obciążeń oś płomienia wyginała się w kierunku ku górze, co poważnie zmniejszało dokładność odczytu.

Pomiaru długości dokonywano optycznie. Dokładność odczytu zależała od kształtu płomienia. Najdokładniejsze były odczyty dla płomieni bez zawirowania powietrza oraz dla płomieni o dużym pędzie powietrza. Przypadki z zawirowaniem powietrza, małych nadmiarów powietrza oraz małych pędów powietrza obarczone są błędem do około $\pm$ 5%. Szczególnie niekorzystnie przedstawiały się płomienie o małych pędach powietrza i niskich $\lambda$, gdyż posiadały one kontur "rozmyty". Wyraźnie widoczne jest to dla dwóch punktów na rysunku 6, które dotyczą nadmiaru powietrza $\lambda = 0,9$.

Podczas pomiarów zauważono, że najistotniejszy wpływ na długość płomienia wywiera struga powietrza. Zwiększenie prędkości wypływu osiągane przez zmniejszenie przekroju wypływu powietrza skraca płomień podobnie jak i zwiększenie strumienia pędu powietrza osiągane drogą zwiększenia $\lambda$. Obciążenie palnika oraz strumień pędu gazu również mają wpływ na długość płomienia, jednak jest on znacznie mniejszy niż wpływ strugi powietrza. Obserwacje te skłoniły nas do sumarycznego ujęcia własności strug gazu i powietrza w formie liczb Reynoldsa $(Re)_g$ i $(Re)_a$.

## 4. Wyniki badań

Rezultaty eksperymentów przedstawiono na rysunkach 4, 5, 6 w formie zależności $\frac{1}{d}\left[(Re)_g, (Re)_a\right]$ dla ustalonych wartości $t_a$, $d_a$ oraz $\alpha$. Linie stałych $(Re)_a$ były tworzone w ten sposób, że z tabeli wyników do-

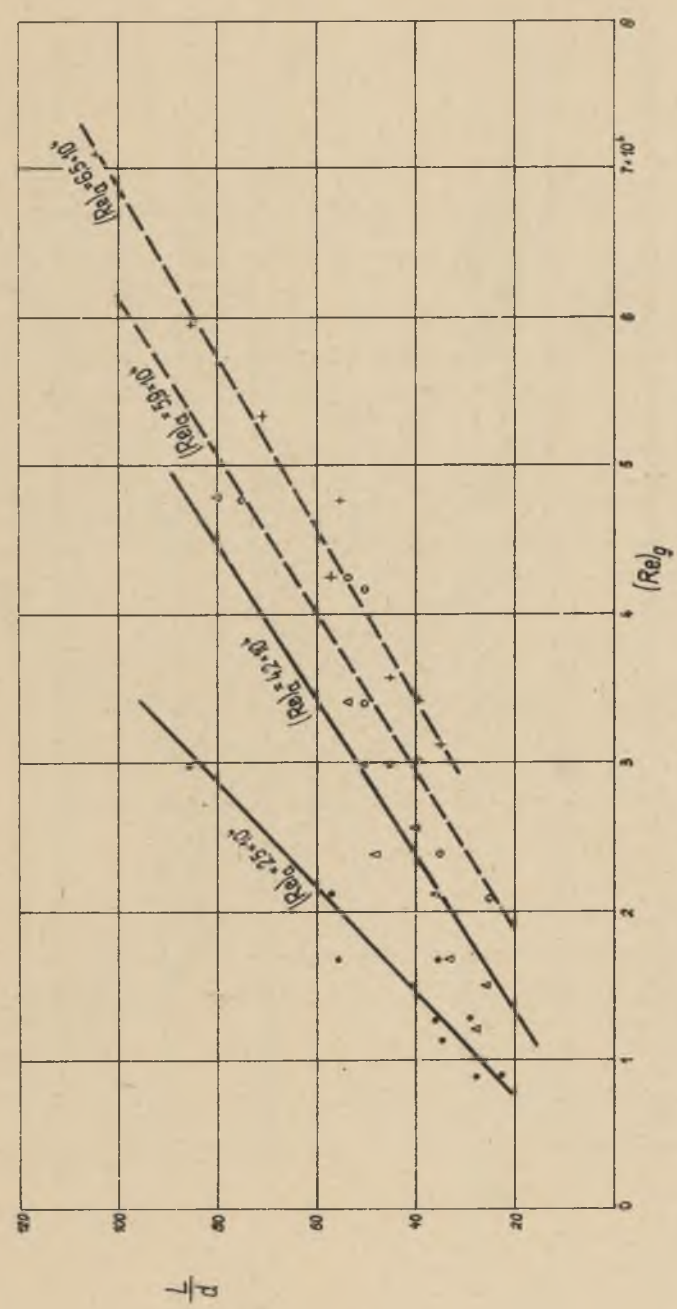
bierano pomiary różniące się od podanej na linii wartości $(Re)_a$ o maksimum $\pm$ 4%. Na liniach tych zatem znajdują się punkty charakteryzujące się różnymi wartościami $\lambda$ w przedziale od 0,8 do 1,35.

Funkcja $\frac{l}{d}\left[(Re)_g\right]$ dla $(Re)_a$ = idem jest linią prostą. Odchylenie punktów pomiarowych od wykreślonej linii zależy od $(Re)_a$. Dla małych liczb Reynoldsa powietrza odchylenie to jest większe, co spowodowane jest mniejszą dokładnością odczytu długości. Palnik o dużej średnicy $d_a$, który charakteryzuje się równocześnie małymi $(Re)_a$, nawet dla bardzo dużych wydajności, posiada największe odchylenie punktów od wykreślonych linii. Tym niemniej i w tym przypadku można zaobserwować zmniejszenie odchyleń przy wzroście $(Re)_a$ co uzyskiwało się podczas eksperymentów przez wzrost obciążenia bądź też wzrost $\lambda$.

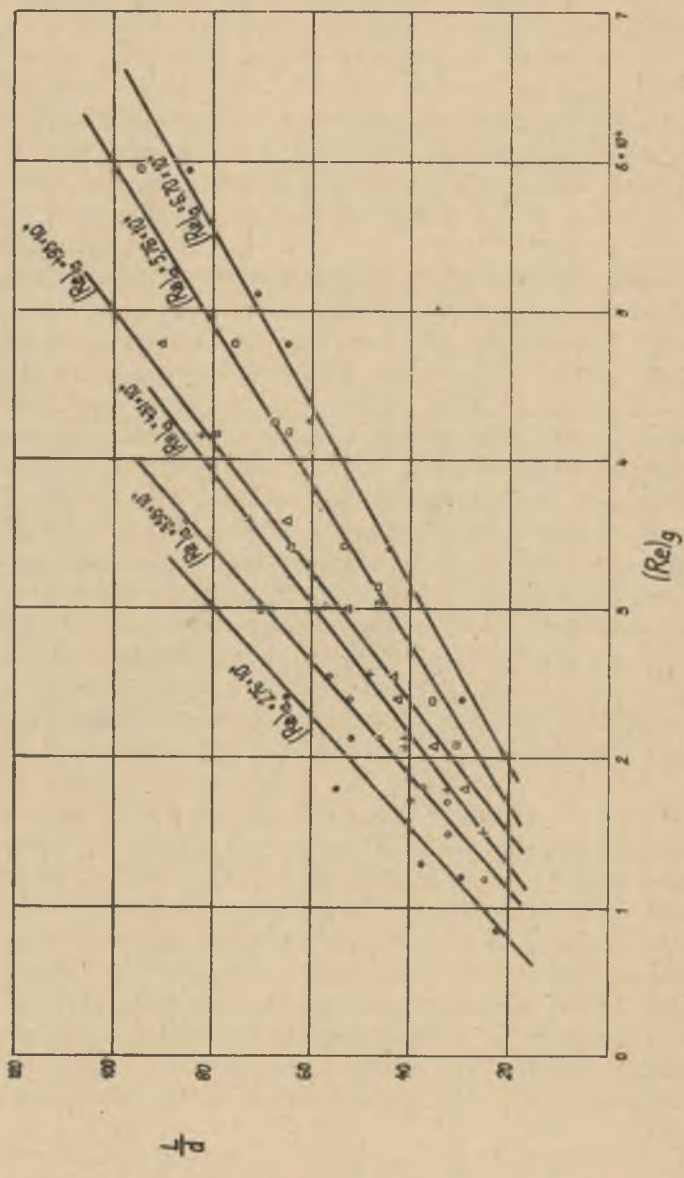
Płomień charakteryzujący się dużą średnicą $d_a$, wykazuje znacznie większą zależność długości od strumienia gazu (rys. 6) niż płomień o małym $d_a$ (rys. 4). Kąt zawirowania strugi powietrza $\alpha = 20^o$ powoduje nieznaczne skrócenie płomienia, tym niemniej cechuje się podobną zależnością długości od strumienia gazu (przy $(Re)_a$ = idem).

Wpływ podgrzania powietrza na długość płomienia ilustruje rysunek 6. Podgrzanie powietrza do temperatury 200°C, przy niezmienionej geometrii palnika oraz niezmienionych parametrach, skraca płomień. Wartości liczby Reynoldsa dla strugi powietrza $(Re)_a$ są znacznie mniejsze dla powietrza podgrzanego. Tym niemniej odpowiednie linie $\frac{l}{d}$ dla stałego $(Re)_a$ znajdują się w dolnej części wykresu (linie ciągłe). Nie istnieje zatem regularność: wzrost długości płomienia ze spadkiem liczby Reynoldsa powietrza. Zastąpienie $(Re)_a$ wielkością $(wd_h)_a$ wprowadza wyżej wymienioną regularność (rys. 7) z jednym wyjątkiem. Linia dla $(wd_h)a = 0,5\ ms^{-1}$ uzyskana została z punktów pomiarowych przy małych wydajnościach gazu oraz przy małych $\lambda$. Punkty te obarczone są największą niedokładnością i to zapewne tłumaczy ich za wysokie położenie.

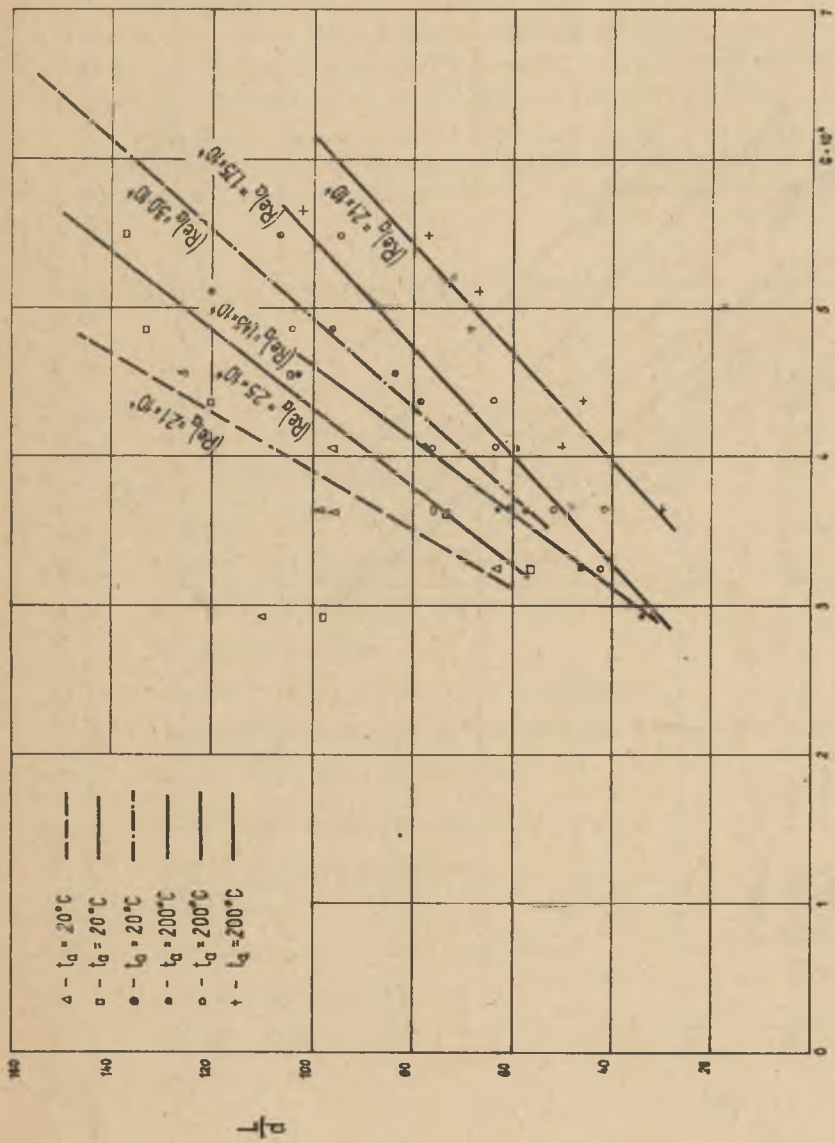
Soroka i Jerinow [5] badając spalanie gazu ziemnego bez zawirowania w palniku typu "rura w rurze" doszli do wniosku, że maksymalna długość występuje przy stosunku $n = (\varrho w^2)_a / (\varrho w^2)_g$ bliskim jedności. Zwiększenie, bądź też zmniejszenie tego stosunku skraca długość płomienia. Próba potwierdzenia tego faktu zakończyła się niepowodzeniem. Występujące w badanych przez nas palnikach wartości n zmieniały się w przedziale od około 0,5 do około 100. Nie zauważono przy tym regularnej zmiany długości ze zmianą n. W badaniach Soroki i Jerinowa wielkość n zmieniała się w przedziale ok. 0,03 do 8,9, w naszym zaś przypadku wielkość ta była zmienna w znacznie większym przedziale i pomimo tego nie zauważono powyższej zależności.



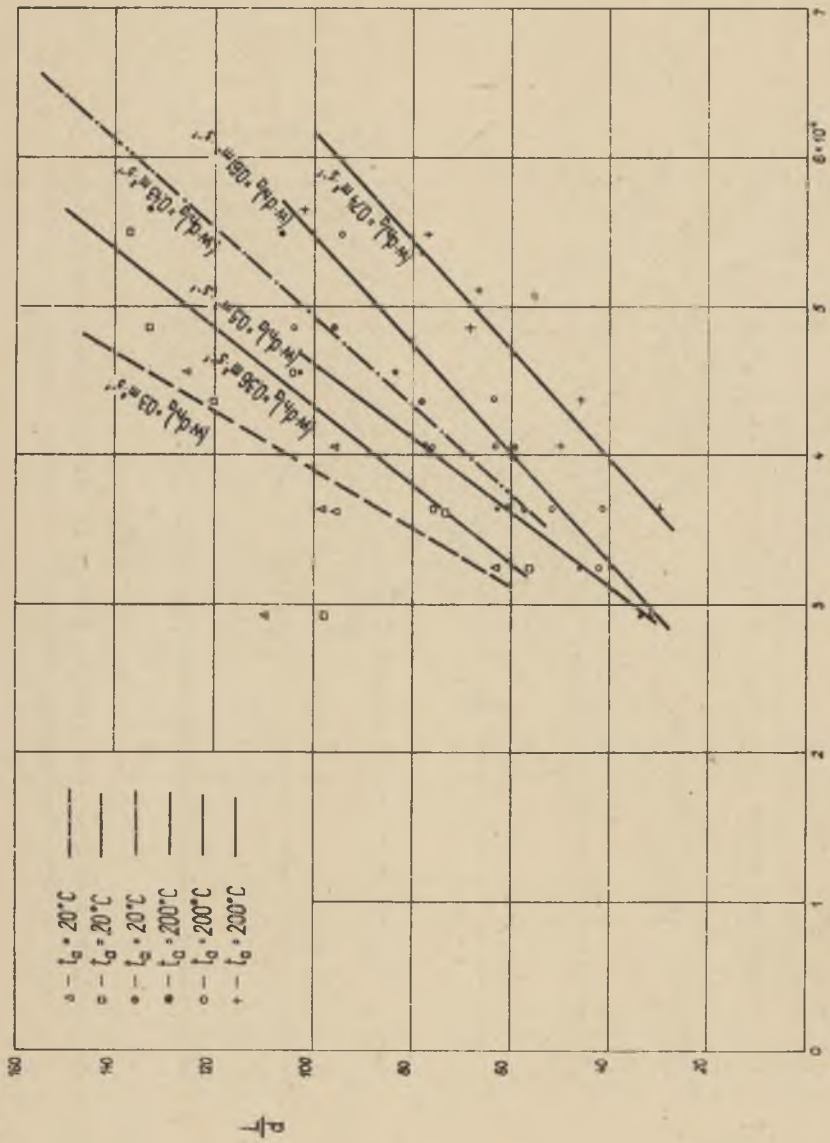

Rys. 4. Bezwymiarowa długość płomienia jako funkcja $(Re)_g$ i $(Re)_a$ dla temperatury powietrza $t_a = 20^oC$, kąta zawirowania powietrza $\alpha = 20^o$ oraz $d_a = 125$ mm




Rys. 5. Bezwymiarowa długość płomienia jako funkcja $(Re)_g$ i $(Re)_a$ dla temperatury powietrza $t_a = 20^oC$, kąta zawirowania powietrza $\alpha = 0^o$ oraz $d_a = 125$ mm




Rys. 6. Bezwymiarowa długość płomienia jako funkcja $(Re)_g$ i $(Re)_a$ dla temperatury powietrza $t_a$ = 20°C i 200°C, kąta zawirowania powietrza $\alpha$ = 20°C oraz $d_a$ = 225 mm




Rys. 7. Bezwymiarowa długość płomienia jako funkcja $(Re)_g$ i $(wd_n)_a$ dla temperatury powietrza $t_a = 20$ i $200^oC$, kąta zawirowania powietrza $\alpha = 20^o$ oraz $d_n = 225$ mm

## 5. Wnioski

Długość dyfuzyjnego płomienia turbulentnego zależy głównie od parametrów strugi powietrznej.

Wzrost obciążenia przy stałych pozostałych parametrach powoduje wzrost długości płomienia zależny od aerodynamiki strugi powietrznej, z tym że dla dużych pędów strugi powietrza wzrost ten jest mniejszy podobnie jak i dla małych $d_a$.

Zawirowanie strugi powietrza pod kątem $20^o$ nieznacznie skraca płomień.

Zwiększenie średnicy wypływu strugi powietrza wydłuża płomień.

Praca wpłynęła do Redakcji w marcu 1973 roku

## SPIS OZNACZEŃ

$A_a$ - pole przekroju wypływowego powietrza,

$d$ - średnica dyszy gazowej,

$d_a$ - średnica wypływu strugi powietrza,

$d_h$ - średnica hydrauliczna strugi powietrza,

$l$ - długość płomienia,

$p_k$ - ciśnienie w przestrzeni komory spalania,

$(Re)_a$ - liczba Reynoldsa strugi powietrza,

$(Re)_g$ - liczba Reynoldsa strugi gazu,

$t_a$ - temperatura powietrza spalania,

$w_a$ - osiowa prędkość powietrza,

$w_g$ - prędkość gazu,

$\alpha$ - kąt zawirowania strugi powietrza,

$\lambda$ - stosunek nadmiaru powietrza,

$\varrho_a$ - gęstość powietrza,

$\varrho_g$ - gęstość gazu.

LITERATURA

1. Badanie palników wirowych na gaz ziemny. Praca badawcza Instytutu Energetyki Gazowej, 1972, nie publikowana.
2. DOMAGAŁA J., FIGNA A., GÓRAL J.: Praca dyplomowa w Instytucie Energetyki Gazowej Pol. Śl., Dąbrowa Górnicza, 1972.
3. LISIENKO W.G.: Stal, 12, 1968, 1144-1148.
4. LISIENKO W.G., KOKARIEW H.J.: 119/h International Gas Conference, IGU/E24-70, Moskwa, 1970.
5. SOROKA B.S., JERINOW A.E.: Tieorija i praktika zżigania gaza. Izd.Niedra, Leningrad, 1972.
6. WÓJCICKI S.: Spalanie, WNT, Warszawa, 1969.
7. ZEMBRZUSKI M., MILLER R.: Arch. Proc. Spalania, 4, 1972, 408-418.

ДЛИНА ПРОМЫШЛЕННЫХ ДИФФУЗИОННЫХ ФАКЕЛОВ ПРИРОДНОГО ГАЗА КАК ФУНКЦИЯ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Р е з ю м е

В работе представлены результаты экспериментальных исследований диффузионного факела природного газа, полученного в горелке с завихрованием и без завихрования струи воздуха. Сделано измерение длины факела оптическим методом для температуры воздуха 20°C и 200°C. Безразмерная длина факела представлена в виде зависимости от числа Реунольдса для воздуха и газа.

THE LENGTH OF INDUSTRIAL DIFFUSION FLAMES OF NATURAL GAS AS A FUNCTION OF INPUT PARAMETERS

S u m m a r y

In this paper the results of experminents on diffusion flames of natural gas in burners with and without swirling of the air stream have been presented. The length of the flame has been measured by an optical way for the air temperature of 20°C and 200°C. The dimensionless length of the flame as a function of Reynolds numbers of the air and gas is presented.