

Ryszard WILK

Instytut Techniki Ciepłej

PRÓBA OCENY ROZKŁADU KONCENTRACJI SADZY
PŁOMIENIA GAZOWEGO

Streszczenie. Skonstruowano sondę zerową do pomiaru ilości sadzy w płomieniu. Przeprowadzono pomiary rozkładu koncentracji sadzy w płomieniu gazowym dla czterech stosunków nadmiaru powietrza. Do opisu takiego rozkładu zaproponowano metodę opartą na pojęciu sumarycznej krzywej ze statystyki matematycznej.

1. WSTĘP

Często wymagane są płomienie o zwiększonej emisyjności ciepła. Jest to stosunkowo łatwe do uzyskania podczas spalania paliw ciekłych i stałych. Natomiast intensywne świecenie płomienia gazowego można uzyskać tylko przez odpowiednio zorganizowane spalanie gazu, zawierającego metan lub inne ciężkie węglowodory.

Powstanie sadzy w płomieniu odbywa się na drodze skomplikowanych i złożonych reakcji endotermicznego rozkładu węglowodorów oraz niezupełnego ich utleniania.

Przy oddzielnym podawaniu substratów do komory paleniskowej występują obszary z niedomiarem tlenu. Cząsteczki węglowodorów, dyfundując do czoła spalania, przechodzą przez strefy wysokiej temperatury ($\sim 1000^{\circ}\text{C}$) i nie dochodząc do czoła ulegają rozkładowi na węgiel i wodór, które dopiero dalej reagując z tlenem dają ówutlenek węgla i parę wodną. W obszarach o dużej koncentracji cząstek sadzy, w warunkach niedomiaru tlenu, temperatura w tych obszarach może obniżyć się do tego stopnia, że część sadzy przechodzi przez strefę z tlenem nie dopalając się. Powstaje wówczas kopcący płomień.

Ze względu na złożoną kinetykę reakcji powstawania sadzy oraz występowanie w płomieniu określonego rozkładu temperatur, należy spodziewać się, że koncentracja sadzy w płomieniu jest wielkością zmienną w przestrzeni i daje się, podobnie jak temperatura, charakteryzować pewnym rozkładem. W niniejszej pracy podjęto próbę opisu takiego rozkładu posługując się pomiarami i wykorzystując do tego celu pojęcia znane ze statystyki matematycznej [5].

2. STANÓWISKO POMIAROWE

Do pomiaru zawartości sadzy w płomieniu zastosowano filtr z materiału porowatego. Koncentracja sadzy określona była przez pomiar przyrostu masy filtru odniesioną do ilości zassanych gazów płomieniowych [2].

Sonda pomiarowa powinna spełniać następujące warunki:

- szybkie schładzanie gazów płomieniowych do temperatury ok. 400°C, dla zmniejszenia szybkości reakcji chemicznej,
- minimalne wymiary sondy umożliwiające lokalność pomiarów, nie zakłócając badanego miejsca,
- opływowe kształty dla zminimalizowania zaburzeń przepływu.

Długość sondy podyktowana jest koniecznością odpowiedniego schłodzenia gazów płomieniowych. Pozostałe wymiary sondy zależą od wielkości płomienia, dostępu do niego itp. Filtr wykonano z porowatego spieku stali nierdzewnej H18N9 (bez tytanu). Materiał ten wytrzymuje wysokie temperatury i ciśnienia. Możliwa jest też regeneracja filtru poprzez jego wyżarzanie w tlenie.

W czasie przepuszczania gazów płomieniowych filtr zatyka się, zwiększając opór przepływu. W celu wyboru porowatości filtrów przeprowadzono badanie zatykania się ich w czasie przepuszczania przez nie gazów spalinyowych. Badaniom poddano filtry o trzech porowatościach, przedstawionych w tablicy 1.

Dane filtrów

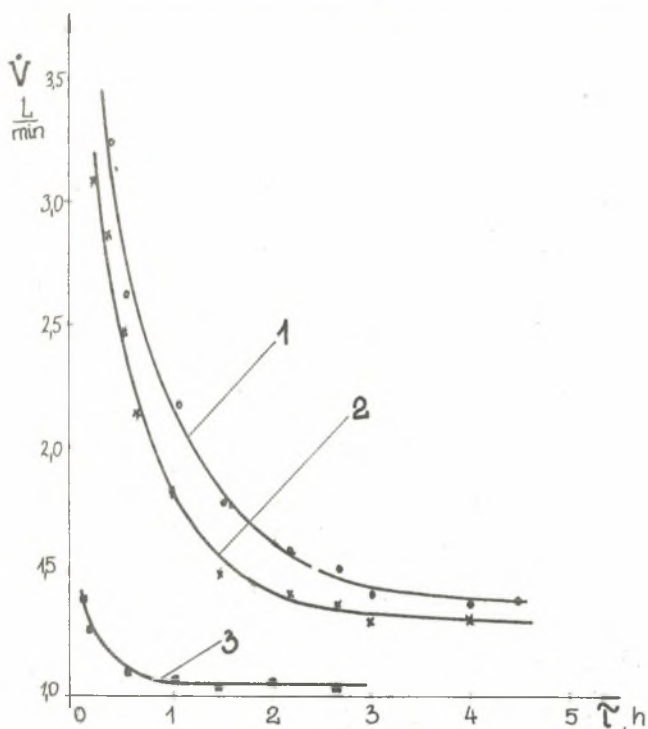
Tablica 1

Lp.	Filtr z porami	Materiał	Wielkość ziarn μm	Maksymalne pory μm
1	małymi	stal nierdzewna H18N9	0,06±0,12	30
2	średnimi	"	0,12±0,2	60
3	dużymi	"	0,2±0,3	90

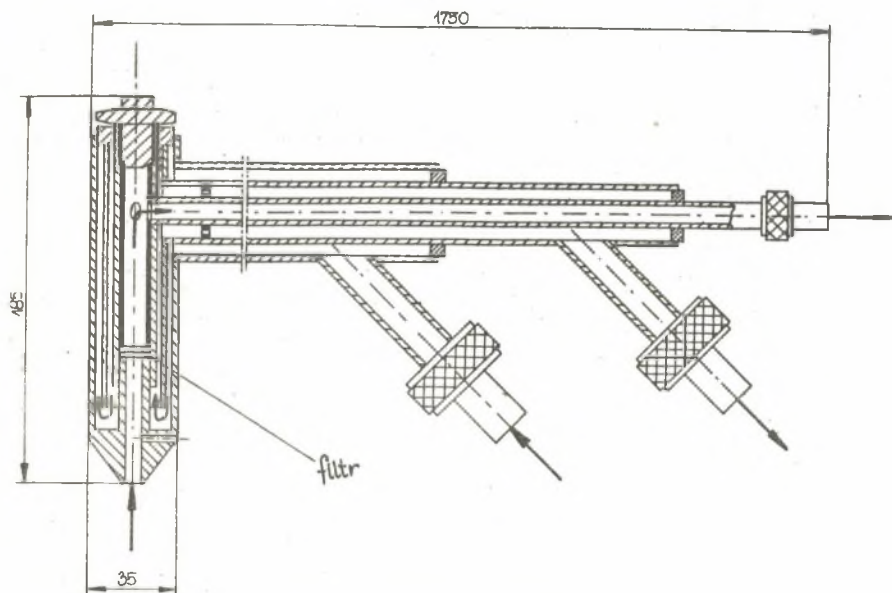
Obserwując zmniejszanie się strumienia gazu w czasie działania (rys.1) stwierdzono, że najszybciej zatyka się filtr nr 1. Filtr nr 3 ma najmniejszy opór przepływu, ale przepuszcza pewną ilość sadzy. Do dalszych więc badań użyto filtr nr 2.

Po przeprowadzeniu sprawdzających obliczeń cieplnych wykonano chłodzoną wodą sondę pomiarową wg projektu przedstawionego na rys. 2.

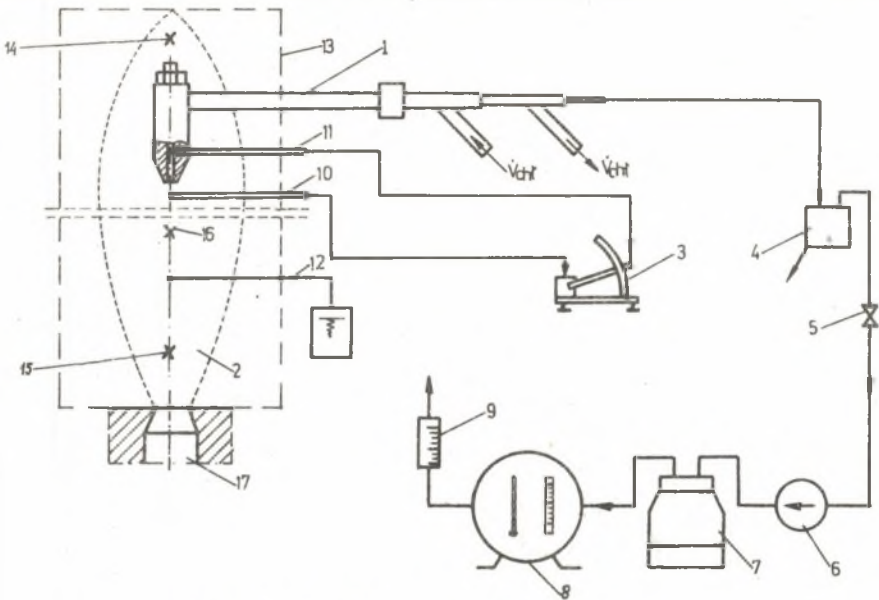
Badania pomiarowe przeprowadzono w płomieniu gazu koksowniczego, spalane go za pomocą palnika typu "Biprohut" 20/40. Stanowisko pomiarowe przedstawiono na rys. 3. Sonda 1 umieszczona była w płomieniu 2 w komorze 13



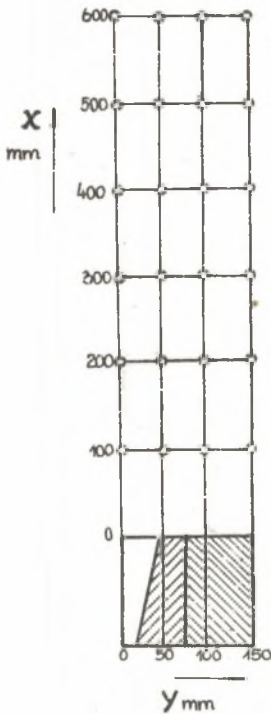
Rys. 1. Zmiana strumienia gazu w czasie przepuszczania go przez filtr



Rys. 2. Sonda pomiarowa



Rys. 3. Schemat stanowiska pomiarowego



Rys. 4. Rozmieszczenie punktów pomiarowych

do badań palników. Chłodzenie wodne obniżało temperaturę gazów płomieniowych w obrębie sondy do temperatury poniżej 400°C , lecz nie powodowało wykrapalania się pary wodnej ze spalin. Woda ta natomiast wykraplała się poza sondę w skraplaczu 4, umieszczonym przed pompą próżniową 6. Zawór 5 oraz rotametr 9 umożliwiły kontrolę strumienia zasysanych gazów płomieniowych. Zbiornik 7 służył do wyrównywania ciśnienia, a gazomierzem wodnym 8 mierzono objętość gazów płomieniowych, którą następnie korygowano dla gazu suchego. W czasie zasysania gazu należy utrzymywać minimalną różnicę ciśnień między bezpośrednim otoczeniem końcówki sondy a wnętrzem sondy. Do kontroli tego służył mikromanometr 3, podłączony do przewodów impulsowych 10 i 11. Termoparą 12 mierzono temperaturę w płomieniu, a termoparami 14, 15 i 16 temperaturę obmurza.

Filtry przed i po pomiarze były suszone oraz ważone na wadze analitycznej z dokładnością $= 0,0001 \text{ g}$.

Pomiary zawartości sadzy przeprowadzono w półpłaszczyźnie płomienia przechodzącej przez jego oś w punktach pomiarowych, przedstawionych na rysunku 4.

3. WYNIKI POMIARÓW [1]

Średni skład chemiczny gazu miejskiego użytego do badań był następujący: $H_2 = 48,73\%$, $CH_4 = 23,52\%$, $CO = 10,95\%$, $N_2 = 9,22\%$, $CO_2 = 3,54\%$, $C_2H_6 = 2,3\%$, $O_2 = 1,74\%$. Temperatura substratów była zbliżona do temperatury pokojowej, zaś ciśnienie manometryczne wynosiło: gazu $p_{mg} = 900 \text{ N/m}^2$, powietrza $p_{ma} = 750 \text{ n/m}^2$.

Badania przeprowadzono dla czterech wartości (0,6, 0,8, 1,0 i 1,1) stosunku λ nadmiaru powietrza.

Koncentrację sadzy obliczono ze wzoru:

$$c = \frac{\Delta m}{V_{gs}}, \quad \frac{\text{mg}}{\text{m}_n^3} \quad (1)$$

gdzie:

Δm - przyrost masy filtru przed i po próbie, mg,

V_{gs} - normalna objętość gazów płomieniowych, suchych zasysanych przez filtr, m_n^3 .

Otrzymane wyniki koncentracji sadzy zawarte są w tablicach 2, 3, 4, 5, a na ich podstawie wykreślono linie stałych koncentracji sadzy w płomieniu (rys. 5).

Tablica 2

Wartości koncentracji sadzy przy stosunku nadmiaru powietrza $\lambda = 0,6$

	Y_{mm}	0	50	100	150
		$c, \text{mg/m}_n^3$			
$\lambda = 0,6$	X_{mm}				
	100	33	27	43	27
$\dot{V}_{gn} = 9,65 \text{ m}_n^3/\text{h}$	200	99	87	37	37
$t_g = 10^\circ\text{C}$	300	250	97	82	56
$p_{pł} - p_{sgn} \approx 5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$	400	714	669	332	144
$t_{ot} = 15^\circ\text{C}$	500	147	499	295	103
$P_{ot} = 976 \text{ mbar}$	600	85	374	210	70
$\varphi_{ot} = 89\%$					

Tablica 3

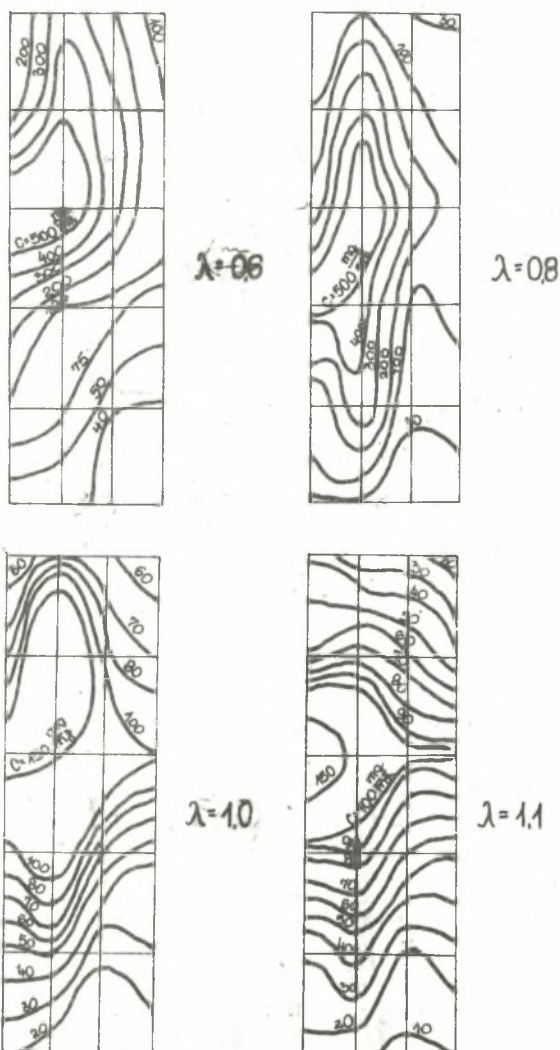
Wartości koncentracji sadzy przy stosunku nadmiaru powietrza $\lambda = 0,8$

$\lambda = 0,8$ $\dot{V}_{gn} = 9,61 \frac{\text{mm}^3}{\text{h}}$ $t_g = 13^\circ\text{C}$ $P_{p\dot{z}} - P_{son} \approx 3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ $t_{ot} = 15,2^\circ\text{C}$ $P_{ot} = 882,9 \text{ mbar}$ $\varphi_{ot} = 64\%$	Y_{mm}	0	50	100	150
	X_{mm}	$c, \text{ mg/m}^3_n$			
	100	25	23	17	16
	200	78	389	35	47
	300	638	427	74	128
	400	231	695	285	113
	500	107	417	118	80

Tablica 4

Wartości koncentracji sadzy przy stosunku nadmiaru powietrza $\lambda = 1,0$

$\lambda = 1,0$ $\dot{V}_{gn} = 9,58 \frac{\text{mm}^3}{\text{h}}$ $t_g = 13^\circ\text{C}$ $P_{p\dot{z}} - P_{son} \approx 7 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ $t_{ot} = 16,0^\circ\text{C}$ $P_{ot} = 976,2 \text{ mbar}$ $\varphi_{ot} = 53\%$	Y_{mm}	0	50	100	150
	X_{mm}	$c, \text{ mg/m}^3_n$			
	100	23	10	12	14
	200	47	52	21	31
	300	89	138	56	41
	400	173	153	142	101
	500	74	373	80	70
	600	54	68	62	52
	700	49	64	48	41



Rys. 5. Linie stałej koncentracji sadzy w półpłaszczyźnie płomienia, w zależności od stosunku λ nadmiaru powietrza

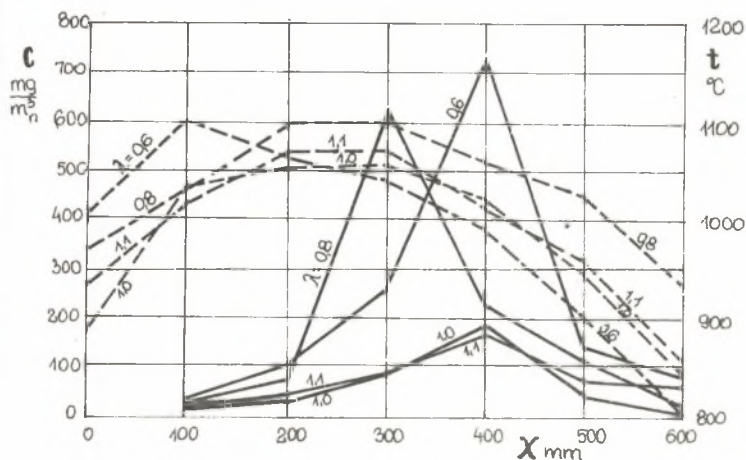
Tablica 5

Wartości koncentracji sadzy przy stosunku nadmiaru powietrza $\lambda = 1,1$

$\lambda = 1,1$ $\dot{V}_{gn} = 9.60 \frac{\text{mm}^3}{\text{h}}$ $t_g = 12^\circ\text{C}$ $P_{pł} - P_{son} \approx 5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ $t_{ot} = 16,1^\circ\text{C}$ $P_{ot} = 972,2 \text{ mbar}$ $\varphi_{ot} = 67\%$	Y_{mm}	0	50	100	150
	X_{mm}	$c, \text{ mg/m}_n^3$			
	100	17	12	8	10
	200	31	45	17	27
	300	85	89	60	53
	400	200	142	96	103
	500	62	76	62	37
	600	41	21	21	17
	700	6	4	14	8

4. ANALIZA WYNIKÓW

Analiza otrzymanych wyników wskazuje, że w objętości płomienia istnieją obszary o różnych, lokalnych koncentracjach sadzy. W osi płomienia koncentracja sadzy jest większa, a maleje ona w zewnętrznych warstwach płomienia. Odległość występowania maksymalnej koncentracji sadzy od wylotu jest prawie zawsze większa od odległości występowania maksymalnej temperatury i wynosi ona (0,5÷0,7) długości płomienia co przedstawiono na rys. 6.

Rys. 6. Rozkład koncentracji sadzy i temperatury w osi płomienia; — koncentracja sadzy c , ---- temperatura t

Uzasadnienie tego zjawiska wynika z analizy mechanizmu powstawania sadzy w płomieniu. Na początku płomienia, gdzie temperatura jest niska, nie ma warunków do rozkładu węglowodorów. W miarę rozwijania się reakcji chemicznej spalania rośnie temperatura i w warunkach niedostatku tlenu następuje termiczny rozkład węglowodorów. Często stosowaną nazwą jest piroliza węglowodorów. Ponieważ reakcja ta przebiega ze skończoną prędkością, maksimum występowania sadzy jest przesunięte względem maksimum temperaturowego. Dalej, w wysokiej już temperaturze, maleje ilość sadzy, ponieważ istnieją korzystne warunki dla dopalania pierwiastkowego węgla.

Do analitycznego opisu rozkładu koncentracji sadzy w płomieniu można wykorzystać pojęcia znane w statystyce matematycznej: sumaryczna krzywa $R_c = f(c)$, średnia koncentracji sadzy \bar{c} oraz odchylenia standardowe tej koncentracji s_c [5]. Wielkość R_c jest sumaryczną objętością płomienia (wyrażoną w % całkowitej objętości), w której koncentracja sadzy jest większa od c .

Zależność $R_c = f(c)$ dla przeprowadzonych badań przedstawiono na rys.7. Obliczono także średnią koncentrację sadzy c wg wzoru:

$$\bar{c} = \sum_i c_i \frac{d R_i}{d c_i} \quad (2)$$

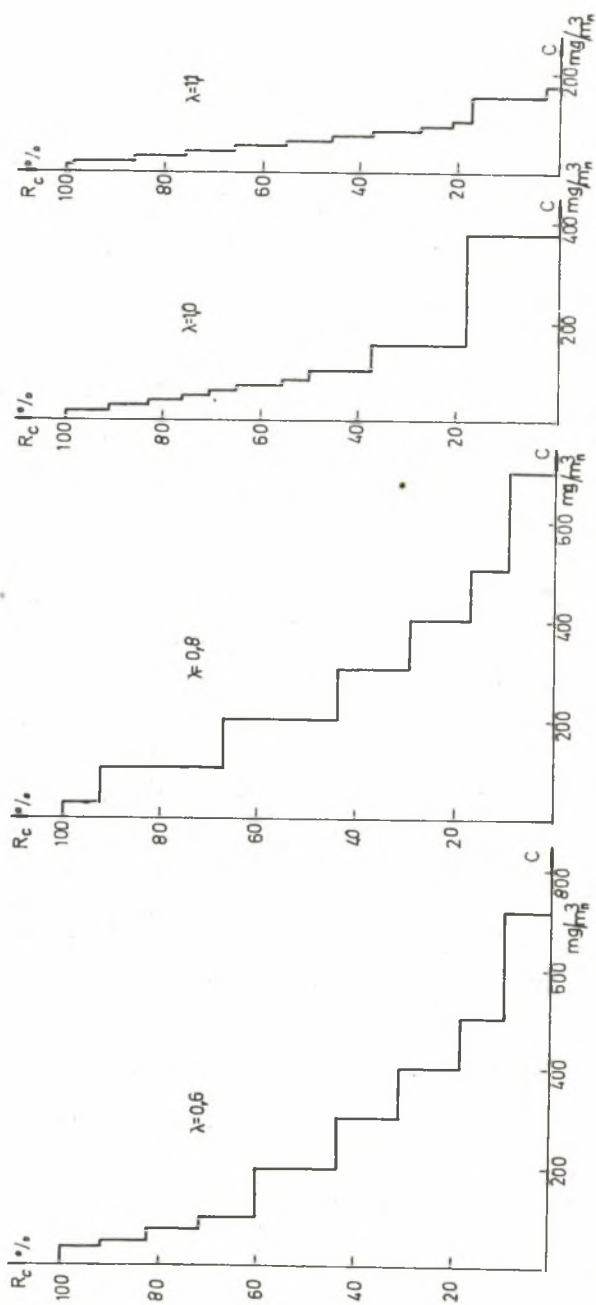
oraz odchylenie standardowe:

$$s_c = \sqrt{\frac{\sum_i (c_i - \bar{c})^2}{n - 1}} \quad (3)$$

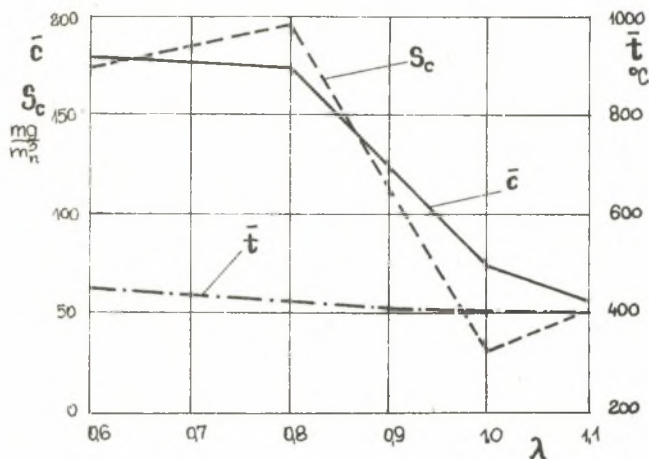
Wielkości te oraz średnią temperatury obmurza przedstawiono na rys. 8.

Z powyższego wynika, a należałoby się tego spodziewać, że w badanym przedziale zawartość sadzy maleje wraz ze wzrostem stosunku nadmiaru powietrza. Maleje także temperatura obmurza wskutek zmniejszonego promieniowania cieplnego. Współczynnik korelacji pomiędzy tymi wielkościami jest $r = 0,921$, co upoważnia do stwierdzenia, że z pewnością 90% zachodzi korelacja między średnią koncentracją sadzy, a temperaturą odbiorników ciepła.

Na podstawie wartości odchylenia standardowego s_c (rys. 8) można stwierdzić, że przy $\lambda = 1$ rozrzut koncentracji sadzy w objętości płomienia jest najmniejszy, natomiast w przypadku $\lambda = 0,8$ największy.



Rys. 7. Sumaryczny wykres rozkładu koncentracji sadzy w zależności od stosunku λ nadmiaru powietrza



Rys. 8. Zależność średniej koncentracji sadzy \bar{c} , odchylenia standardowego S_c oraz średniej temperatury obmura \bar{t}_0 od stosunku λ nadmiaru powietrza

5. ZAKOŃCZENIE

Wyniki badań przeprowadzonych w niniejszej pracy obarczone są pewnymi błędami, jak np.: dopływ fałszywego powietrza przez nieszczelności obmura, zmienna wilgotność powietrza itp. Również, ze względu na małą zawartość metanu w gazie koksowniczym, uzyskane wyniki obarczone są względnie dużym błędem. Jednak dają się zauważyć pewne prawidłowości, które np. w przypadku spalania gazu ziemnego byłyby tylko bardziej wyraźne.

Badania prowadzone w niniejszej pracy należą do badań nad strukturą płomieni przemysłowych, prowadzonych w Instytucie Techniki Ciepłej Politechniki Śląskiej. Należy je traktować jako propozycję ujęcia rozkładu koncentracji sadzy płomienia za pomocą pojęć ze statystyki matematycznej. Metodę taką można także zastosować do opisu rozkładu temperatury, entalpii, egzergii i składu płomienia. Podobne metody, oparte na idei wykresu uporządkowanego, były już proponowane do opisu rozkładu ww. wielkości [3].

Teoretyczne rozważania nad wydzielaniem się sadzy przy spalaniu czystego CH_4 z niedomiarem tlenu, zawarte są w pracy [4], skąd wynika, że wydzielanie się sadzy ma swoje maksimum, przy $\lambda \approx 0,1$.

Na zakończenie autor składa podziękowania prof. dr hab. inż. Ryszardowi Peteli za cenne wskazówki przy redagowaniu niniejszej pracy.

LITERATURA

- [1] Brożek M.: Badania zawartości sadzy w płomieniu gazowym za pomocą sondy zerowej. Pr. dypl. inż. ITC Pol.Śl., 1976.

- [2] Olejniczak M.: Badania zawartości sadzy w płonieniu. Pr.dypl. mgr ITC Pol. Śl., 1972.
- [3] Petela R., Wilk K.: Egzergia płomienia. Gospodarka Paliwami i Energią. 3/1975.
- [4] Tomeczek J.: Kompozycja stanu równowagi produktów spalania metanu z wydzielaniem się stałych cząstek węgla. Zeszyty Naukowe Pol.Śl. Energetyka 43, 1972.
- [5] Volk W.: Statystyka stosowana dla inżynierów. WNT, Warszawa 1965.

ПОПЫТКА ОЦЕНКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ САЖИ
ГАЗОВОГО ПЛАМЕНИ

Р е з ю м е

Сконструирован зонд для измерения количества сажи в пламени. Проведены измерения распределения концентрации сажи в газовом пламени для четырёх отношений избытка воздуха. Для описания такого распределения предложен метод, опирающийся на понятия суммарной кривой из математической статистики.

AN ESTIMATION ATTEMPT OF THE DISTRIBUTION OF SOOT CONCENTRATION
IN A GASEOUS FLAME

S u m m a r y

A zero tube to measure soot contents in a gaseous flame has been constructed. Measurements of soot concentration distribution in a flame have been carried out for four primary excess air ratios. The method of description for this distribution has been proposed on the basis of the concept of a summary mass curve.