

Rudolf ZAMOJDO

Jerzy GUZOWSKI

Instytut Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów  
Politechniki Wrocławskiej

## AERODYNAMIKA PALENISKA Z PALNIKAMI SUFITOWYMI

**Streszczenie.** Przedstawiono wyniki badań modelowych aerodynamiki komory paleniskowej wyposażonej w sufitowe, szczelinowe palniki pyłowe i cztery strumienie powietrza przeznaczonego do spalania. Podano opis modelu, sposób zamodelowania palników i dysz powietrznych oraz metodę pomiarów wektorów prędkości w modelu. Zbadano wariant pracy symetrycznego układu 6 z 9 zabudowanych palników dla warunków projektowych oraz różnych wartości stosunków pędów poszczególnych strumieni. Wyniki przedstawiono wykresalnie. Określono główne czynniki wpływające na charakter przepływu.

## 1. Wstęp

Palniki sufitowe nie znajdowały dotychczas zastosowania w rozwiązaniach krajowych kotłów energetycznych. Projektowany dla jednej z elektrociepłowni krajowych kocioł parowy ma być opalany odpadami węgla kamiennego o stosunkowo niskiej wartości opałowej 14,6 - 15,7  $\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$  i zaniżonej zawartości części lotnych. Trzy młyny węglowe, z których dwa przewidziane są do pokrycia wydajności nominalnej kotła, zasilają dziewięć sufitowych palników szczelinowych, umieszczonych w jednym rzędzie nad przednią częścią komory paleniskowej, zwaną przedsionkiem. W normalnej pracy czynnych jest sześć palników pyłowych. Powietrze potrzebne do spalania podzielono na cztery strumienie: powietrze I nośne wypływa w postaci mieszanki pyłowo-powietrznej przekrojem wewnętrznym palnika, powietrze II, stanowiące główną część, wypływa przekrojem otaczającym palnik pyłowy, powietrze III wypływa z 4 dysz, usytuowanych na ścianie przedniej poniżej połowy paleniska, powietrze IV wypływa z 18 dysz, usytuowanych równomiernie na suficie przedsionka obok palników. Dalszy układ powierzchni ogrzewalnych jest typowy dla krajowych kotłów energetycznych o dwuciągowym układzie kanałów spalinowych. Masowe natężenia przepływów i parametry powietrza podaje tabela 1.

Tabela 1

Powietrze	Oznaczenie	Natężenie przepływu $\text{kg/s}$	Udział w %	Temperatura $^{\circ}\text{K}$
I	M1	15,3	29,8	373
II - 85%	M2	17,7	34,4	648
II - 15%	M2 <sup>x/</sup>	3,1	6,1	648
III	M3	12,5	24,3	648
IV	M4	2,8	5,4	648

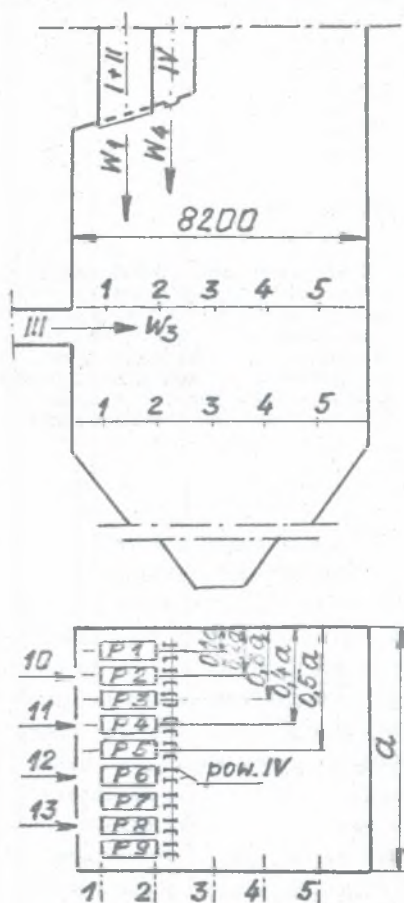
Razem

51,4

100,0

x/ - powietrze chłodzące wyłączone z pracy palniki.

Sekundowe zużycie paliwa przez kocioł wynosi  $B = 9,3 \text{ kg/s}$ . Schemat komory paleniskowej wraz z układem palników i dysz powietrznych podano na rys.1.



Rys.1. Schemat komory paleniskowej

Fig.1. Combustion chamber

poprzecznie strumieniem, złożonym z 4 strug powietrza III. Ze względu na fakt wyłączenia trzech palników, zespół strug pionowych nie jest jednorodny.

Tory turbulentnych strug równoległych, wypływających z zespołu dysz, badał Jung [1] i Schreck [2]. Pomimo uzyskania nieco odmiennych wyników obaj stwierdzają, że główną rolę w modelowaniu strug odgrywa stosunek pędu wypływającej strugi do pędu wyrównanego strumienia całkowitego. Iwanow [3] badał tory zespołu strug równoległych o przekroju kołowym, wpływających do poprzecznego strumienia w zależności od stosunku  $s/d$ , tj. względnej podziałki dysz oraz w zależności od średnicy otworu wlotowego strugi. Stwierdził m.in., że nie można podać ogólnego równania torów strug dowolnej średnicy z jednakowym stosunkiem  $s/d$  oraz, że zmniejszenie tego stosunku wpływa

Oznaczone symbolami  $p_1 - p_9$  palniki przedstawione są jako tzw. palniki zastępcze mieszanki pyłowo-powietrznej i powietrza II. Liczbami 10 - 13 oznaczono dysze powietrza III usytuowane na ścianie przedniej komory. Podziałka względna palników sufitowych wynosi  $s_1/b_1 = 1,44$ , gdzie  $s_1$  - odstęp palników,  $b_1$  - szerokość szczeliny. Podziałka względna dysz powietrza III wynosi odpowiednio  $s_3/b_3 = 4,66$ . Stosunek szerokości komory do szerokości szczeliny powietrza III wynosi 22,6. W przypadku pracy 2 młynów i symetrycznego układu pracujących 6 palników, biorąc pod uwagę system technologiczny połączeń palników z młynami, należy wyłączyć palniki  $p_2$ ,  $p_5$  i  $p_8$ . Zaprojektowany układ ma zapewnić ukształtowanie się płomienia w postaci litery U.

## 2. Model paleniska

Oddziałujący na komorę strumień mieszanki pyłowo-powietrznej i powietrza drugiego, stanowiący ok. 70% całego natężenia przepływu, można traktować jako zespół strug równoległych. Strumień ten w odległości równej ok.  $2/3$  wysokości przedsionka od wylotu z palników przecinany jest

na zmniejszenie głębokości wnikania strug do strumienia. Nieizotermiczność strug uwzględnia Iwanow zachowując parametr  $\rho_2 w_2^2 / \rho_1 w_1^2$  dla przepływu nieizotermicznego i izotermicznego, gdzie indeksem "1" oznaczono gęstość i prędkość strumienia głównego, zaś indeksem "2" - odpowiednio strugi wpływającej do strumienia. Jak wiadomo, spełnienie tego warunku sprowadza modelowanie palnika do odtworzenia z zachowaniem geometrycznego podobieństwa, co wpływa na znaczne zwiększenie stosunków pędów w modelu w porównaniu z obiektem rzeczywistym.

W projektowaniu dysz palników sufitowych i dysz powietrza III w modelu przyjęto następujące założenia:

- zastąpiono oddzielne dysze mieszanki pyłowo-powietrznej i powietrza II jedną dyszą zastępczą metodą Żelkowskiego [4],
- zachowano jednakowe stosunki pędów pojedynczej strugi zastępczej do strumienia wypływającego z przedsionka komory, w modelu i obiekcie rzeczywistym,
- zachowano jednakowe stosunki pędów pojedynczej strugi powietrza III do strugi zastępczej wpływającej z palnika sufitowego, w modelu i obiekcie rzeczywistym,
- przyjęto, że przekrój wylotowy przedsionka wynosi ok. połowy przekroju komory paleniskowej,
- przyjęto, że w miejscu doprowadzenia powietrza III, stopień wypalenia paliwa wynosi  $\alpha = 0,85$ .

Na podstawie danych projektowych kotła przeliczono odpowiednio palnik zastępczy i dysze powietrza w celu ustalenia prędkości wylotowych i stosunków pędów w obiekcie rzeczywistym oraz na podstawie wyżej podanych założeń wyznaczono przekroje dysz i prędkości w modelu. Zestawienie wyników podano w tabeli 2.

Tabela 2

Wyszczególnienie	Obiekt rzeczywisty			Model	
	$F_i$ $m^2$	$w_i$ $m/s$	$\frac{m_i w_i}{m_p w_p}$	$F_i$ $m^2$	$w_i^{x/}$ $m/s$
Palnik zastępczy	0,404	19,7	0,385	0,0032	21,2
Dysze powietrza III	0,144	40,0	0,34	0,0015	29,0
Dysze powietrza IV	0,007	40,6	0,017	$54 \cdot 10^{-6}$	35,4

<sup>x/</sup> przy założonej średniej prędkości wylotowej z przedsionka  $w_p = 6$  m/s.

Model komory paleniskowej i kanałów kotła wykonano z płyt szkła organicznego o grubości 6 mm, połączonych za pomocą spawania. Biorąc pod uwagę wydajność i sprzężenie będącego do dyspozycji wentylatora przyjęto skalę zmniejszenia modelu 1 : 19 w stosunku do obiektu rzeczywistego, co gwarantowało możliwość uzyskiwania liczb Reynoldsa w granicach  $1 \cdot 10^5 - 1,2 \cdot 10^5$  w przekroju wylotowym komory. Zapewniało to prowadzenie badań w drugim obszarze samomodelowania przepływów. Pozostałe powierzchnie konwekcyjne zamodelowano w postaci płyt perforowanych, zapewniających odpowiednie opory zastępcze [5], [6].

### 3. Metodyka pomiarów

Natężenie przepływu powietrza, zasysanego do modelu przez wentylator z regulowaną liczbą obrotów, mierzono za pomocą zwężek, zabudowanych na rurach palnikowych i rurach powietrza III, którymi powietrze doprowadzano do specjalnych skrzyń rozdzielczych z dyszami. Powietrze IV zasysano jedną rurą pomiarową, w której zabudowano 18 przewodów, doprowadzających powietrze do paleniska. Warunki pomiarowe uzyskiwano na drodze przysłania otworów wlotowych do rur.

Pomiarów wektorów prędkości dokonywano za pomocą sondy impulsowej 51 kanałowej o średnicy kulki 7,5 mm, zabudowanej na prawej ścianie modelu, wsuwanej do komory przez otwory 1 - 5. Sondę uprzednio przewzorcowano w celu uzyskania jej charakterystyki. Ciężnienie dynamiczne mierzono za pomocą mikromanometru bateryjnego o pochyleniu 1:5 i 1:10. Przeprowadzono także wizualizację przepływów z ich fotografowaniem.

### 4. Wyniki badań

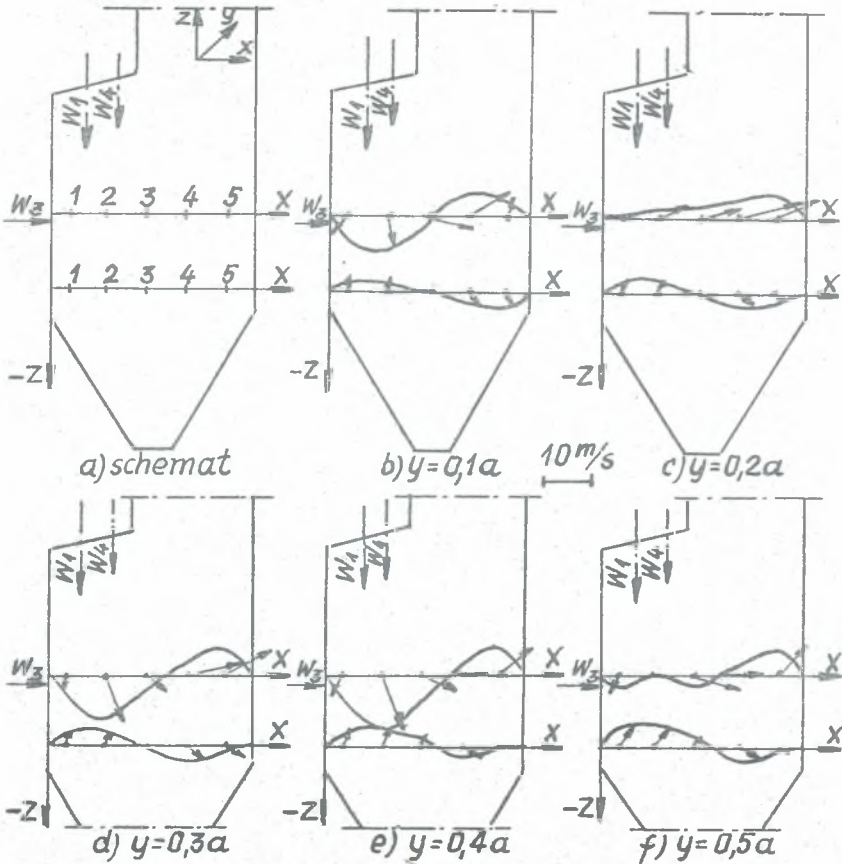
#### 4.1. Badania wariantu projektowego

Na rys.2 przedstawiono rozkłady wektorów prędkości w płaszczyznach ZX w 2 przekrojach pomiarowych dla różnych odległości pomiarowych "y" od ściany bocznej. Ze względu na osiąganą symetrię rozkładów wektorów podano wyniki dla połowy szerokości komory od 0,1a - 0,5a, gdzie przez "a" oznaczono szerokość komory. Wyniki wskazują na znaczną nierównomierność pól prędkości wzdłuż głębokości i szerokości komory. Stwierdzono, że:

- największe osłabienie przepływu w dół komory występuje w obszarach znajdujących się pod wyłączonymi palnikami sufitowymi,
- szczególne zmniejszenie składowych pionowych wektorów, a nawet zmiana ich kierunku, występuje w obszarze pod palnikami 2 i 8, na który oddziałują dysze 10 i 13 powietrza III,
- z wykresu dla  $y = 0,2a$  wynika, że część powietrza przepływa do kanału wylotowego przed pierwszym przekrojem pomiarowym,
- wielkości wektorów w dolnej części komory wskazują, że tylko część z całkowitej ilości powietrza dociera do tego obszaru. Kierunki wektorów wskazują na tworzenie się wiru prawoskrętnego od tylnej ku przedniej ścianie komory paleniskowej,
- nie uzyskuje się pożądanego charakteru przepływu powietrza w kształcie litery U.

#### 4.2. Badania dodatkowe

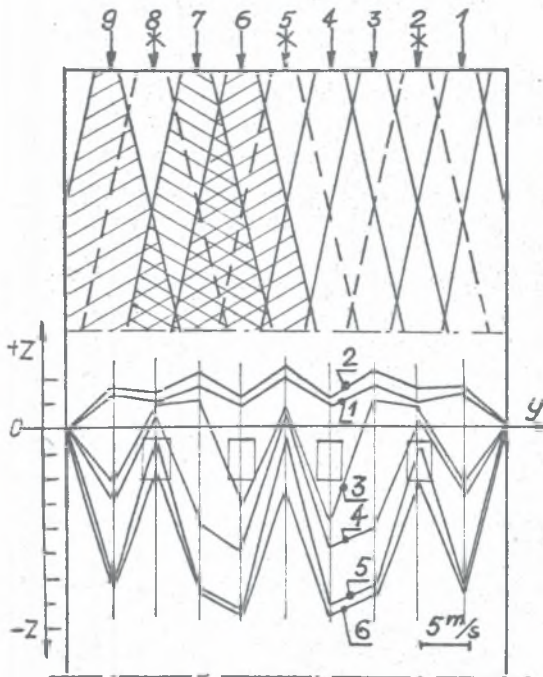
W celu wyjaśnienia przyczyn powstawania nierównomierności przepływu na wylocie z przedsionka przeprowadzono dodatkowy eksperyment, polegający na uruchomieniu wszystkich 9 palników sufitowych. Powietrze III podawano jak poprzednio przez 4 dysze. Pomiarów dokonano dla dwóch różnych wartości podciśnienia w palenisku, a więc i dwóch różnych prędkości wypływu strug i prędkości strumienia całkowitego w przedsionku. W tym przypadku ograniczono się do pomiarów wektorów przez otwór pomiarowy 2 górnego prze-



Rys.2. Wykresy składowych wektorów prędkości w płaszczyznach ZX wzdłuż szerokości komory. Wyłączone palniki 2, 5 i 8.

Fig.2. Components of velocity vectors in ZX plane. Design modification - burners 2, 5, 8 out of operation.

kroju pomiarowego, przesuwając sondę wzdłuż szerokości kotła. Jak bowiem wynika z uprzednich pomiarów, w obszarze tym występuje największa nierównomierność przepływu i najbardziej uwidacznia się oddziaływanie strug z palnikami sufitowymi i strug powietrza III. Wyniki przedstawione są na rys.3 w postaci krzywych 1 i 2, stanowiących obwiednie składowych pionowych  $W_z$  wektorów prędkości. Obliczone wartości prędkości wylotowych strug i stosunków pędów przedstawiono w tabeli 3 w pozycjach 1 i 2. Średnią prędkość w przedsonku  $W_p$  wyliczono z sumy natężeń przepływów wpływających strug. Uzyskane wyniki wskazują na stosunkowo dobre wyrównanie pól prędkości przy pracy 9 palników. Charakterystyczne jest dla obu przypadków ukierunkowanie wektorów ku górze, a więc w kierunku okna wylotowego z komory. Porównując wartości składowych pionowych wektorów z wartościami prędkości średniej, podanej w tabeli 3, należy wnioskować, że część



Rys.3. Pola prędkości w płaszczyźnie ZY

- 1, 2 - 9 palników czynnych,  
 3-6 - 6 palników czynnych,  
 3 - zwiększony pęd powietrza III,  
 4 - wariant projektowany,  
 5 - zwiększony pęd z palników sufitowych,  
 6 - przepływ bez powietrza III i IV

Fig.3. Velocity field in ZY plane

- 1, 2 - 9 burners active,  
 3-6 - 6 burners active,  
 3 - greater momentum of air III,  
 4 - design modification,  
 5 - greater momentum from roof mounted burners,  
 6 - flow without air III and IV.

powietrza nie dociera w ogóle do górnego przekroju pomiarowego. Droga strumienia ulega więc skróceniu, wypełnienie komory jest niedostateczne. Oddziaływanie strug powietrza III uwidacznia się w zmniejsz-

Tabela 3

Oznaczenie wariantu	Prędkości			Stosunki pędów			Stosunek prędkości $\frac{w_1}{w_p}$	Uwagi
	$w_1$ m/s	$w_3$ m/s	$w_p$ m/s	$\frac{m_1 w_1}{m_p w_p}$	$\frac{m_1 w_1}{m_3 w_3}$	$\frac{m_3 w_3}{m_p w_p}$		
1	18,8	23,6	6,87	0,23	1,34	0,17	2,74	9 palników
2	22,2	27,7	8,04	0,236	1,33	0,177	2,76	"
3	21,9	33,7	6,47	0,36	0,85	0,42	3,53	6 palników
4 <sup>x/</sup>	21,9	28,1	6,0	0,41	1,3	0,32	3,7	"
5	27,8	26,0	6,6	0,54	2,4	0,22	4,16	"
6	25,6	0	4,8	0,89	$\infty$	0	5,4	"

x/ wariant o warunkach nieznacznie odbiegających od projektowanych.

szeniu wartości składowych pionowych w miejscach położonych naprzeciw otworów wlotowych tego powietrza. Jak wynika z tabeli 3, dla obu wariantów uzyskano jednakowe stosunki prędkości i stosunki pędów. Jest to potwierdzeniem faktu, że badania prowadzone w obszarze automodelowym.

W celu określenia wpływu wartości stosunków pędów i pędu powietrza III na kształtowanie się pól prędkości przy pracy przewidzianych w projekcie 6 palników sufitowych w układzie symetrycznym, przeprowadzono dalsze badania z wyłączonymi palnikami sufitowymi 2, 5 i 8. Jak uprzednio, ogra-

niczono się do pomiarów wektorów prędkości przez otwór 2 górnego przekroju pomiarowego. Wyniki pomiarów przedstawiono na rys.3 - krzywe 3 - 6 oraz w tabeli 3 - pozycje 3 - 6. Wariant 3 ilustruje wpływ zwiększonego pędu powietrza III przy zbliżonej do wartości projektowych wartości stosunku pędu z palników sufitowych -  $m_1 w_1$  do pędu strumienia całkowitego -  $m_p w_p$ .

Wariant 4 przedstawia kształtowanie się pola prędkości wzdłuż szerokości kotła dla wariantu podstawowego, pola prędkości, którego w płaszczyznach ZX przedstawiono uprzednio na rys.2, a wyniki omówiono w p.2. Porównanie wariantów 3 i 4 pozwala stwierdzić, że zwiększenie pędu powietrza III-go wpływa na zmniejszenie składowych pionowych wektorów. W punktach pod palnikami 7 i 3, w warunkach zwiększonego pędu powietrza III, występuje nawet odwrócenie przepływu w kierunku ku górze. Spowodowane jest to tym, że wypływające z dysz 10 i 13 strugi powietrza III nie ulegają oddziaływaniu wyłączonych palników 2 i 8.

Wariant 5 przedstawia kształtowanie się pola prędkości przy zwiększeniu pędu z palników sufitowych, wariant zaś 6 pod wpływem wyłączenia powietrza III i IV. Wyłączenie tego powietrza powoduje również wzrost stosunków pędu powietrza z palnika sufitowego do pędu strumienia całkowitego. Przebiegi krzywych są podobne. Wyłączenie powietrza III powoduje, jak widać, pewien wzrost składowych pionowych wektorów pod wyłączonymi palnikami sufitowymi. Wzrost ten spowodowany jest oddziaływaniem rozszerzających się strug z sąsiednich palników sufitowych. Ponieważ dotyczy to jedynie peryferyjnych obszarów tych strug, wzrost składowych pionowych jest nieznaczny.

## 5. Wnioski z badań

1. Aerodynamika paleniska z palnikami sufitowymi przy pracy symetrycznego układu 6 z 9 zabudowanych palników charakteryzuje się znaczną nierównomiernością przepływu w strefie wylotowej z przedsionka komory. Jak stwierdzono, główną przyczyną nierównomierności jest wyłączenie 3 palników sufitowych.
2. Występująca znaczna deformacja pól prędkości wzdłuż szerokości i długości komory jest przyczyną słabego wypełnienia dołu komory paleniskowej i powstawania w niej wiru prawoskrętnego.
3. Oddziaływanie strug powietrza III jest zależne od ich usytuowania względem nieczynnych palników sufitowych.
4. Potwierdza się zależność długości wnikanía strug od wartości stosunku pędu pojedynczej strugi do pędu strumienia całkowitego.
5. Wypełnienie komory paleniskowej i odpowiednie ukształtowanie przepływu w palenisku z palnikami sufitowymi zależy od doboru właściwej wartości stosunków pedów, a więc od odpowiedniego określenia przekrojów wlotowych palników i ich równomiernego rozmieszczenia nad przedsionkiem komory.

## LITERATURA

- [1] Jung R. Grundzüge der von parallelen Schlitzbrennern ausgehenden Rauchgasstroemung in Feuerräumen. Mitteilungen der VGB, 90/1964
- [2] Schreck C. Stroemungsuntersuchungen an Brennerstrahlen. Mitteilungen der VGB, 90/1964
- [3] Ivanov, Saar i Sujj.: Issledowanie trajektorij kruglych turbulentnych struj, razwiwajuscichsia w ograniczennom popierecznom potokie. Izwiestia Akademii Nauk SSSR, nr 3, 1957
- [4] Żelkowski J.: Modelowanie przepływu w komorach paleniskowych. Archiwum procesów spalania, Nr 4, 1972
- [5] Kutateladze S., Ljachowski D.: Modelirowanie tepłoengetičeskogo oborudowanija. Energia, Moskwa. 1966
- [6] Idelcik I.: Aerodynamika promyšlennych apparatov. Energia, Moskva 1964

## АЭРОДИНАМИКА ТОПКИ С ПОТОЛОЧНЫМИ ГОРЕЛКАМИ

## Резюме

Приводятся результаты модельных исследований аэродинамики топки, оснащенной потолочными целевыми горелками и четырьмя потоками воздуха, предназначенного для горения. Дано краткое описание модели, способ моделирования горелок и методика измерения векторов скорости на модели. Исследовано случай совместной работы 6-ти из 9-ти встроенных, симметрически расположенных горелок для разных значений соотношений количества движения отдельных потоков воздуха. Результаты даны в виде эшор скоростных полей в двух измерительных сечениях по высоте топки. Определены параметры, влияющие на характер движения потока в топке.

## THE AERODYNAMICS OF THE FURNACE WITH CEILING BURNERS

## Summary

The results of simulation studies on the aerodynamics of a combustion chamber provided with roof-mounted slot powder - fuel burners and with four air streams are presented.

The model was described, the method of modelling the burners and air nozzles was discussed, and the method for measuring velocity vectors was provided 6 out of 9 burners were studied as for design conditions and for different ratios of momentums of particular streams.

The results were plotted as velocity fields in two cross sections along the height of the combustion chamber. Main factors effecting the character of flow were determined.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Ludwik Cwynar

Wpłynęło do Redakcji w marcu 1986 r.