

Krzysztof Badyda, Janusz Lewandowski, Andrzej Miller

Instytut Techniki Ciepłej

## BADANIE CHARAKTERYSTYK DYSZ WIROWYCH

W pracy przedstawiono wyniki badań wirowych dysz wtryskowych oraz ich porównanie z rezultatami obliczeń. Badano charakterystyki przepływowe dysz, wielkość średnic kropeł i kąta rozpylania oraz wpływ czynników zewnętrznych. Otrzymane wyniki znalazły zastosowanie praktyczne przy opracowaniu projektu instalacji wtrysku kondensatu do gardzieli wylotowej upustowo-kondensacyjnej turbiny dużej mocy.

W badaniach dysz brali także udział mgr inż. Bohdan Grunwald i mgr inż. Krzysztof Jurek z ITC PW.

### 1. WSTRP

W eksploatacji turbiny 13 UK125-6 w Elektrociepłowni Sierkierki w Warszawie w niektórych stanach ruchowych stwierdzono występowanie nadmiernie wysokich temperatur pary, szczególnie na wylocie z części niskoprężnej turbiny. Przeprowadzone badania i analizy wykazały, że w celu zapobieżenia skutkom tego zjawiska konieczne jest zainstalowanie na wylocie z turbiny instalacji wtrysku kondensatu [1], [2]. Poprawne wykonanie takiej instalacji wymagało właściwego doboru bądź zaprojektowania dysz wtryskowych z uwzględnieniem właściwości określonych przez charakterystykę przepływową, kąt rozpylenia, średnicę kropeł, zasięg strugi, wzajemny wpływ strug wylotowych z różnych dysz i wpływ strumienia unoszenia (pary wylotowej z turbiny).

W dotychczasowych pracach (np. [3,5,7]) znaleźć można kilka metod obliczeń dysz wtryskowych, lecz dają one rezultaty odbiegające, często istotnie, od wyników pomiarów. Należy także zauważyć, że produkowane dla potrzeb krajowej energetyki dysze wtryskowe pracują w innego typu instalacjach [4], zatem są konstruowane i badane pod ich kątem. Stąd warunkiem prawidłowego wykonania rozpatrywanej instalacji wtryskowej było przeprowadzenie odpowiednich badań doświadczalnych dysz.

W artykule przedstawiono uzyskane wyniki badań oraz porównano je z rezultatami obliczeń.

## 2. OBLICZENIA DYSZ WTRYSKOWYCH PRZEWIDZIANYCH DO BADAŃ

W ramach prac przygotowawczych do badań po wstępnej selekcji wytypowano do dalszych rozważań grupę siedmiu rodzajów dysz wtryskowych, z których pięć oparte było na konstrukcji opracowanej w ITC Łódź (CBKK-ZN-69) (rys.1). Pozostałe dwa rodzaje stanowiły dysze kątowe (rys.2) wykonane wg projektu autorów.

Obliczenia podstawowych parametrów strugi wylotowej dla wszystkich dysz wykonano w oparciu o zasadę maksymalnego przepływu dla cieczy doskonałej [3]. Obliczenia przeprowadzone wg prezentowanej w [5] metody uwzględniającej lepkość wykazały, że jej wpływ na stałą geometryczną dyszy wynosi od 2% dla dysz osiowych (rys.1) do 6% dla kątowych (rys.2). W związku z tym zgodnie z [3] uznano wpływ lepkości za pomijalnie mały. Wyniki obliczeń dysz podano w tabl.1. Poszczególne symbole w tej tabelicy oznaczają:

A - stała geometryczna dyszy,

$\mu$  - współczynnik natężenia przepływu,

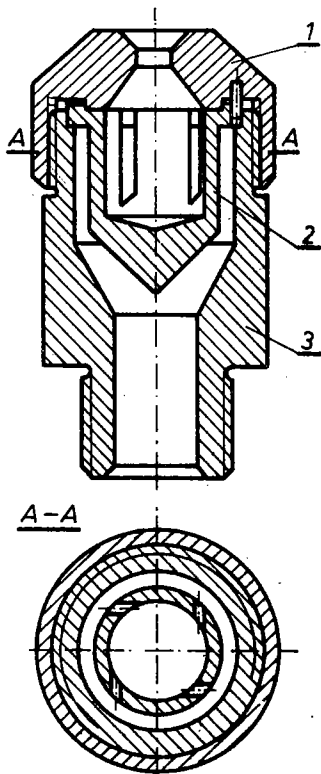
$2\alpha$  - kąt rozpylenia cieczy,

G - strumień masy przepływającej przez dyszę wody,

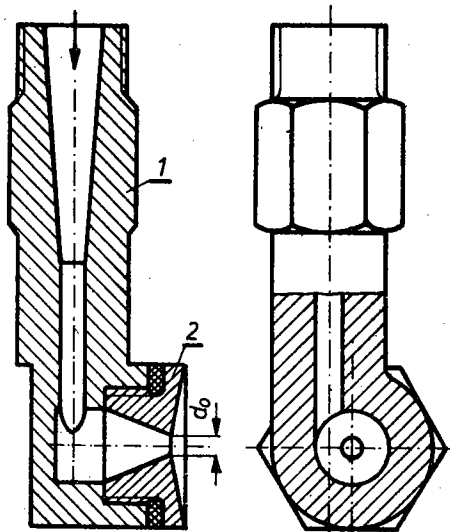
$W_{wl}$  - prędkość,

$A_z$  - stała geometryczna dyszy uwzględniająca wpływ lepkości.

Do obliczeń przyjętego: spadek ciśnienia dyszy  $\Delta p = 0,8$  MPa i temperaturę wody zasilającej  $t_w = 40^\circ\text{C}$ .



Rys.1. Dysza osiowa z kierownicą o stycznych nacięciach; 1 - końcówka, 2 - kierownica ze stycznymi nacięciami, 3 - korpus dyszy



Rys.2. Dysza ze stycznymi nawierceniami (dysza kątowna); 1 - korpus, 2 - końcówka dyszy

T a b l i c a 1

Wyniki obliczeń parametrów strumienia wylotowego dysz

Lp.	Typ i średnica dyszy [mm]	A	$\mu$	$2\alpha$	G [kg/s]	$A_z$
1	osiowa $\varnothing$ 5	0,589	0,563	$60^\circ$	0,440	0,584
2	osiowa $\varnothing$ 3	0,353	0,677	$44^\circ$	0,190	0,349
3	osiowa $\varnothing$ 2,5	0,295	0,715	$39^\circ$	0,140	0,291
4	osiowa $\varnothing$ 2	0,236	0,755	$34^\circ$	0,094	0,232
5	osiowa $\varnothing$ 1,5	0,177	0,804	$27^\circ$	0,057	0,174
6	kątowna $\varnothing$ 4	1,375	0,365	$87^\circ$	0,183	1,300
7	kątowna $\varnothing$ 3	1,417	0,359	$89^\circ$	0,101	1,331

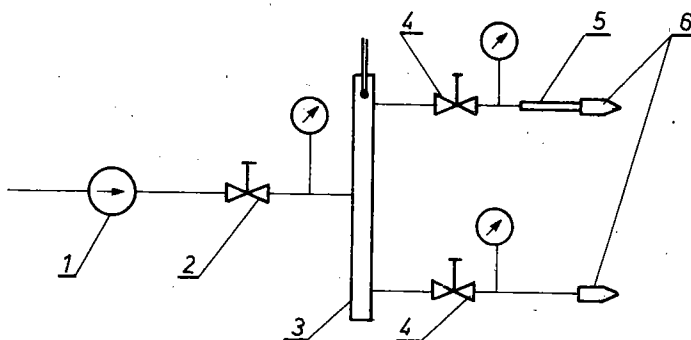
### 3. ZAKRES BADAŃ ORAZ OPIS STANOWISKA POMIAROWEGO

Przeprowadzone badania dysz wtryskowych obejmowały następujący zakres:

- wyznaczenie wydajności dyszy oraz ich charakterystyk przepływowych, to jest zależności natężenia przepływu czynnika roboczego od spadku ciśnienia;
- określenie zasięgów strug;
- określenie kątów rozpylania oraz charakterystyki kątowej dyszy, tzn. zależności kąta rozpylania od spadku ciśnienia wody zasilającej;
- określenie wielkości kropeł, rozkładu ich wielkości wzdłuż strugi;
- określenie wpływu ciśnienia wody zasilającej na wielkość kropeł;
- wyznaczenie przebiegu strug przy współpracy dwóch dysz, których strugi zderzają się pod różnymi kątami;
- badanie wpływu zderzenia strug na wielkość kropeł;
- badanie wpływu prędkości otaczającego powietrza na kształt i zasięg strugi.

Część z wymienionych badań miała charakter jakościowy.

W celu przeprowadzenia wymienionych wyżej badań, na terenie Elektrociepłowni Siekierki wybudowano stanowisko doświadczalne, na którym starano się zapewnić warunki badań możliwie

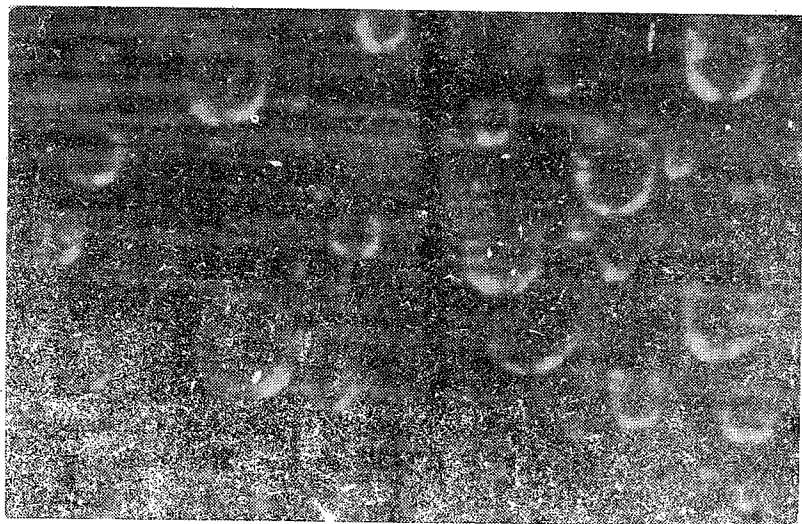


Rys.3. Schemat stanowiska do badania dysz; 1 - pompa, 2 - zawór regulacyjny, 3 - kolektor, 4 - zawór odcinający, 5 - przewód elastyczny, 6 - badane dysze

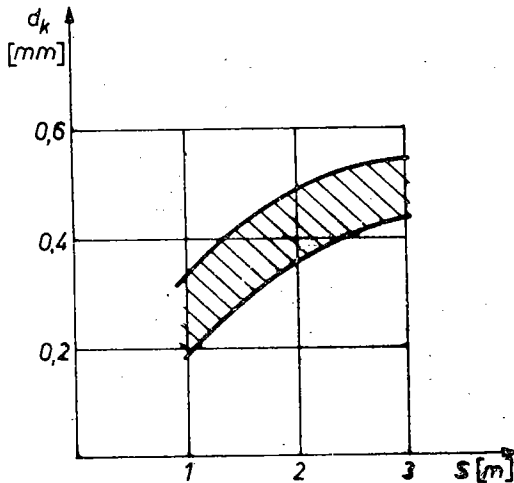
bliskie przewidywanym warunkom pracy dysz w instalacji. Schemat tego stanowiska przedstawiono na rys.3. Badania przeprowadzono dla wirowych dysz osiowych o średnicach otworów 5, 3, 2,5 oraz wirowych dysz kątowych o średnicach 4 i 3.

#### 4. POMIAR WIELKOŚCI KROPEL

Przy pomiarach wielkości kropeł rozpylanej wody wykorzystano metodę wylapywania kropeł przez ciecz imersyjną. Średnicę kropeł określano na podstawie próbek pobieranych z rozpylonego strumienia do niewielkich naczynek, których dno pokryto uprzednio olejem silikonowym (ciecz imersyjna). Do naczynek wkładano następnie odcinki drutu o średnicy 0,1 mm i próbki fotografowano. Wykorzystując obraz drutu o znanej średnicy określono skalę fotogramów, co pozwalało wyznaczyć średnicę kropeł. Przykładową fotografię próbki pobranej w celu wyznaczenia średnic kropeł przedstawiono na rys.4.



Rys.4. Krople wody rozpylanej w dyszy osiowej  $\varnothing 5$  -  
- odległość od wylotu - 3 m, ciśnienie 0,85 MPa, mak-  
symalne średnice kropeł do 0,6 mm



Rys.5. Zależność średnicy kropeł od odległości od wylotu z dyszy

Średnica od dyszy jest związany, jak się wydaje, z rekombinacją kropeł. Spadek ciśnienia wody zasilającej dyszę powoduje niewielki przyrost średnic kropeł. Wpływ ten jest jednak trudny do określenia ilościowego.

## 5. POMIAR KĄTA ROZPYLANIA I OKREŚLENIE GRANICY ZANIKU ROZPYLANIA

Pomiary kąta rozpylania strugi przeprowadzano dwiema metodami: mechaniczną - z wykorzystaniem kątomierza o przestawnym ramieniu oraz fotograficzną. Badanie przeprowadzono dla wszystkich dysz w zakresie spadków ciśnień 0-0,75 MPa. Wyniki podano w tabl. 2. Przykładową fotografię strugi wykonaną w celu określenia kąta rozpylenia przedstawiono na rys.6.

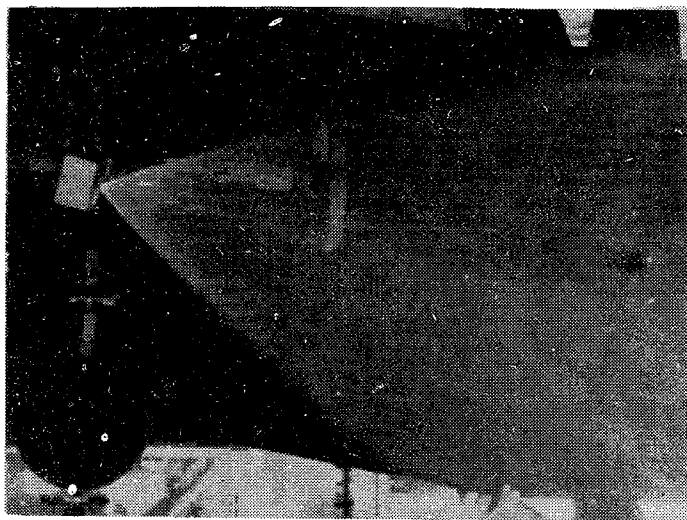
Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że w szerokim zakresie spadków ciśnienia kąt rozpylenia strugi jest praktycznie stały. Przy spadku ciśnienia powyżej 0,6 MPa wykazuje on nieznaczną tendencję do wzrostu (do 10%). Jako charakterystyczny dla danej dyszy można zatem uznać kąt roz-

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów można stwierdzić, że średnice kropeł wykazują tendencje do wzrostu wraz z odległością od wylotu dyszy (rys.5). Przy odległościach rzędu 1 m od dyszy największe krople nie przekraczają średnicy 0,2 mm przy dyszy  $\varnothing 2$  i 0,3 mm przy dyszy  $\varnothing 5$ . W odległości 3 m osiągają one średnice odpowiednio 0,4 i 0,6 mm. Wzrost średnicy wraz z odległością

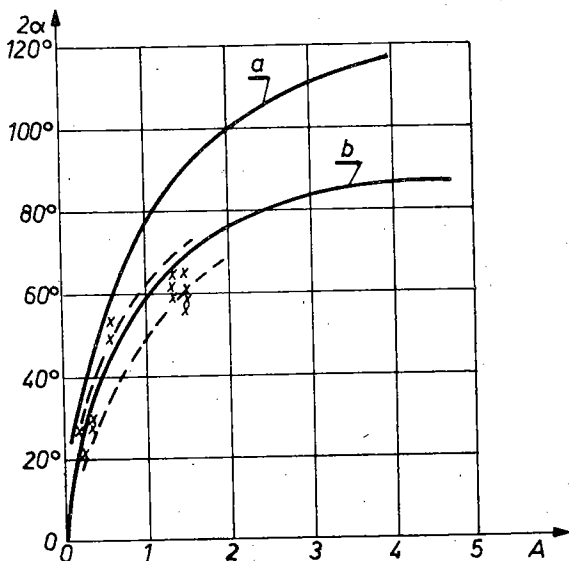
T a b l i c a 2

Średnie wyniki pomiaru kąta i granicy rozpylenia

Lp.	Typ dyszy	Kąt rozpylenia przy nadciśnieniu [MPa]					Granica rozpylenia [MPa]
		0,75	0,6	0,4	0,3	0,2	
1	osiowa $\varnothing$ 5	60°	50°	50°	50°	50°	0,05
2	osiowa $\varnothing$ 3	35°	30°	30°	30°	30°	0,13
3	osiowa $\varnothing$ 2,5	30°	30°	30°	28°	30°	0,12
4	osiowa $\varnothing$ 2	27°	25°	23°	23°	-	0,13
5	kątowa $\varnothing$ 4	65°	65°	63°	60°	60°	0,10
6	kątowa $\varnothing$ 3	60	65	60	56	56	0,12

Rys.6. Fotografia strugi wylotowej przeznaczona do określenia kąta rozpylenia; dysza kątowa  $\varnothing$  4, ciśnienie 0,8 MPa

pylenia z przedziału 0,2÷0,6 MPa. Poniżej 0,2 MPa we wszystkich dyszach daje się obserwować szybki spadek kąta rozpylenia, aż do zaniku kropeł przy spadkach ciśnień od 0,05 do 0,15 MPa.

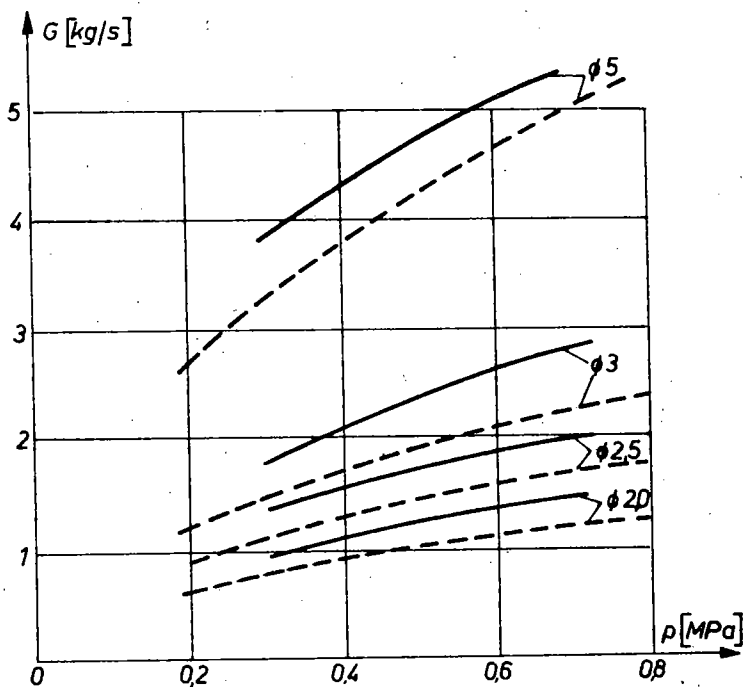


Rys.7. Zależność kąta rozpylenia dyszy  $2\alpha$  od stałej geometrycznej  $A$ ; a-według zasady maksymalnego przepływu, b-według równania Kułagina, krzyżkami zaznaczono zmierzony zakres wartości dla każdego z rodzajów dysz

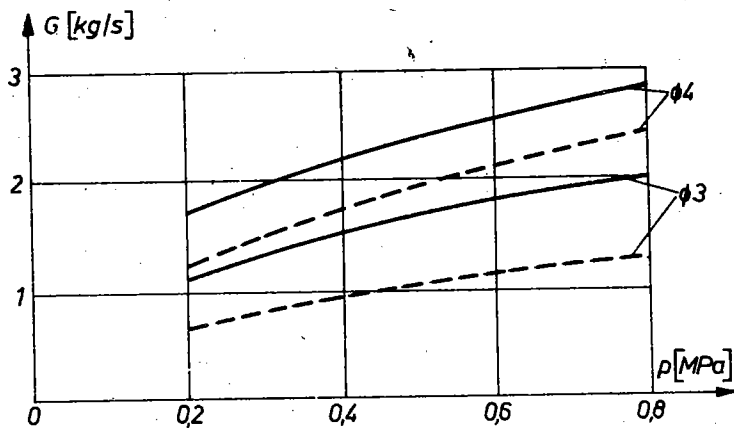
Zgodnie z [3] kąt rozpylenia jest zależny od stałej geometrycznej dyszy. Stąd na rys.7 przedstawiono wielkość kąta rozpylenia w funkcji stałej geometrycznej. Na rysunku zaznaczono kąt obliczony w oparciu o zasadę maksymalnego przepływu [3] (linia a), wyznaczony z zależności Kułagina [6] (linia b), oraz naniesiono wyniki pomiarów autorów. Należy stwierdzić, że wyniki pomiarów kąta rozpylenia dają wartości mniejsze niż obliczone z zależności opartych o zasadę maksymalnego przepływu, co potwierdza u-

wagi przedstawione w pracy [3]. Są one natomiast praktycznie zgodne z wynikami uzyskanymi przy wykorzystaniu zależności Kułagina [6]. Wartości granic rozpylenia dla poszczególnych typów dysz zestawiono w ostatniej kolumnie tabl. 2. Podane w pracy [4] wartości minimalnego spadku ciśnienia warunkującego dobre rozpylenie wynoszą dla rozpatrywanych dysz osiowych (rys.1) ok. 0,3 MPa. Jest to znacznie więcej niż stwierdzono w przeprowadzonych badaniach.





Rys.8. Charakterystyki osiowych dysz wtryskowych;  
 — wyniki pomiarów,  
 --- wyniki obliczeń



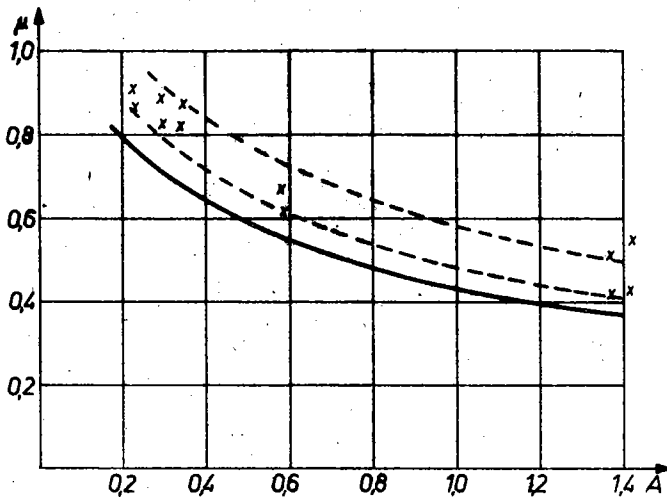
Rys.9. Charakterystyki kątowych dysz wtryskowych;  
 — wyniki pomiarów,  
 --- wyniki obliczeń

## 6. POMIARY WYDAJNOŚCI I CHARAKTERYSTYKI PRZEPLYWOWEJ DYSZ

Pomiary wydajności prowadzono przy wykorzystaniu wyskalowanego zbiornika i stopera. Uzyskane uśrednione wyniki w postaci charakterystyk przepływowych, to jest zależności natężenia przepływu od spadku ciśnienia w dyszy, przedstawiono na rys.8 i 9. Dla porównania liniami przerywanymi zaznaczono charakterystyki obliczeniowe otrzymane dla cieczy doskonałej (p.2). Rysunek 8 dotyczy dysz osiowych, zaś rys. 9 - dysz kątowych.

Porównanie wyników pomiarów i obliczeń wskazuje na różnice w natężeniach przepływu dochodzące do 20% przy dyszach o małych otworach wylotowych. Wydajności rzeczywiste są wyższe od obliczeniowych.

Istotnym parametrem określającym wydajność dyszy jest współczynnik natężenia przepływu  $\mu$  [3], zależący od stałej geometrycznej dyszy oraz stopnia wypełnienia czynnikiem robo-

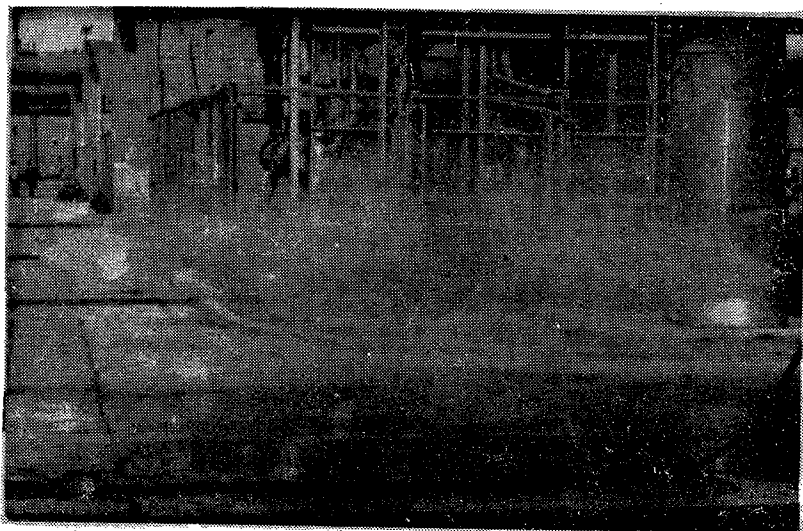


Rys.10. Zależność współczynnika natężenia przepływu od stałej geometrycznej dla badanych dysz; x - skrajne wartości otrzymane dla danego rodzaju dyszy, — wykres otrzymany w oparciu o zasadę maksymalnego przepływu

czym otworu wylotowego. Przyjmując model doskonały czynnika roboczego i zasadę maksymalnego przepływu do wyznaczenia wydajności dyszy, stopień wypełnienia otworu wylotowego można określić w funkcji stałej geometrycznej dyszy, co pozwala sporządzić zależność współczynnika wydatku od stałej geometrycznej [3]. Zależność tę przedstawiono na rys.10 linią ciągłą. Na tym samym rysunku zaznaczono pasmo, w którym zawierają się współczynniki wydatku wyznaczone w oparciu o pomiar natężenia przepływu. Szerokość tego pasma określona jest przez wpływ na współczynnik wydatku stopnia wypełnienia strugi, zmiennego zależnie od parametrów przepływu.

## 7. WPŁYW CZYNNIKÓW ZEWNĘTRZNYCH NA WŁASNOŚCI STRUGI

Na podstawie obserwacji i pomiarów stwierdzono, że wpływ mieszania na własności rozpylonych strumieni jest nieznaczny. Przy niewielkim kącie zderzenia się dwóch strug tworzy się strumień wypadkowy o zbliżonych własnościach. Obszar pokryty zasięgiem strug maleje nieco po stronie krzyżujących się strumieni. W wypadku mieszania pod kątem  $180^{\circ}$  (rys.11) widoczna



Rys.11. Mieszanie się dwóch przeciwprądowych strug wylotowych; dysze osiowe  $\varnothing 5$ , odległość 4,5 m, ciśnienie 0,8 MPa

jest wyraźnie strefa zderzenia. Przy umieszczeniu dysz na-  
przeciwko siebie w odległości poniżej 0,7 m daje się zauważyć  
wzrost średnic kropel. Przy większych odległościach wpływ mie-  
szania na kropelki jest niezauważalny.

W celu wyznaczenia wpływu prędkości unoszenia na własności  
strugi umieszczono badane dysze w strumieniu powietrza o prę-  
dkości 10÷20 m/s. Przy ustawieniu przeciwprądowym (rys.12)  
zmniejszeniu zasięgu strugi towarzyszy nieznaczny tylko wzrost



Rys.12. Obraz strumienia wypływającego z dyszy kąto-  
wej  $\emptyset 4$  w przeciwprądzie ze strumieniem powietrza wypływa-  
jącego z wentylatora

kąta rozpylenia. Pozostałe własności strumienia pozostają bez  
zmian. Przy napływie powietrza prostopadłym do kierunku wylotu  
struga zostaje odchylona w odległości ok. 1 m za wylotem dy-  
szy, a jej zasięg w strumieniu unoszonego powietrza znacznie  
rośnie.

## 8. PODSUMOWANIE

Jak wskazuje porównanie wyników tabl.1 i tabl.2 oraz prze-  
bieg charakterystyk przepływowych z rysunków, weryfikacja

obliczeniowych параметров дисз вtryskowych okazała się niezbędna. Uzyskane wyniki wykorzystano przy opracowywaniu projektu wspomnianej na wstępie instalacji wtryskowej. Na ich podstawie ustalono liczbę, rodzaje i rozmieszczenie dysz w gardzieli wylotowej [1], [2]. Instalacja pracuje poprawnie od sierpnia 1983 r. Założenia do jej budowy oparte na niniejszych badaniach w pełni się potwierdziły w praktyce eksploatacyjnej.

#### BIBLIOGRAFIA

1. Miller A. i in.: Układ wtrysku kondensatu do gardzieli skraplacza turbiny 13UK-125-6 w Elektrociepłowni Siekierki. Energetyka 5/1984.
2. Miller A., Lewandowski J. i in.: Opracowanie projektu, przeprowadzenie badań oraz nadzór nad wykonaniem układu wtryskowego kondensatu do gardzieli kondensatora turbiny 13UK 125-6. Opracowanie DHN PAN sierpień 1985 (nie publikowane).
3. Orzechowski Z.: Rozpylanie cieczy. WNT, Warszawa 1976.
4. Adamowicz K., Kucharuk W.: Dysze ciśnieniowe do schładzaczy wtryskowych. Prace Instytutu Techniki Ciepłej Z. 50/72, Łódź.
5. Borodin W.A. i in.: Raspyliwanije židkostiej. Maszynostrojenije, Moskwa 1967.
6. Kułagin L.W., Moroszkina M.A.: Forsunki dla raspyliwanija tiazelych topliw. Maszynostrojenije, Moskwa 1973.
7. Ditiakin J.F. i in.: Raspyliwanije židkostiej. Maszynostrojenije Moskwa 1977.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ФОРСУНОК

#### А н н о т а ц и я

В работе приводятся результаты исследований центробежных впырсковых сопел и их сравнение с результатами вычислений. Исследуются расходные характеристики сопел. Значения диаметров капель и угла распыления, а также влияние внешних факторов. Полученные результаты нашли применение при разработке проекта установки впырска конденсата в приемный потрубок конденсатора турбины большой мощности с отбором пара.

INVESTIGATION OF CHARACTERISTICS OF VORTEX TYPE  
INJECTION NOZZLES

## S u m m a r y

The results of tests of vortex type injection nozzles in comparison with theoretical computations data have been presented. The flow characteristics of nozzles, droplet size, atomization angle and influence of external factors have been examined. The obtained results have been applied in practice in design of condensate injection system into the condenser throat of extraction - condensing steam turbine of large output.