

Andrzej SZAJNER

Henryk BIELIŃSKI

Katedra Techniki Ciepłej

Wydziału Budowy Maszyn

Politechniki Gdańskiej

ZASIEG PODWÓJNEGO PŁASKIEGO STRUMIENIA SWOBODNEGO

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych podwójnego płaskiego strumienia swobodnego dla odległości pomiędzy szczelinami nawiewnymi w zakresie do 10 szerokości szczelin. Pomiary rozkładów składowej osiowej prędkości umożliwiły przedstawienie ogólnej zależności opisującej spadek prędkości w osi strumienia podwójnych. Podobieństwo profili prędkości w strefie głównej umożliwia wyznaczenie pozostałych parametrów strumienia. Stwierdzono niższą lokalną ilość powietrza w ruchu niż w strumieniu pojedynczym.

1. WSTĘP

Jednym z rodzajów przepływów występujących w ochronie środowiska, wentylacji i klimatyzacji są płaskie strumienie nawiewane z dwu równoległych szczelin leżących stosunkowo blisko siebie. Jeżeli szczeliny mają takie same wymiary oraz geometrię, to strumień wypływający z tych szczelin można nazwać strumieniem płaskim podwójnym. Strumień ten, podobnie jak płaski strumień pojedynczy, powyżej liczby Reynoldsa $Re = 10^3$ może być traktowany jako turbulentny i ten rodzaj przepływu z reguły występuje w urządzeniach przemysłowych. Płaskie strumienie podwójne nie mają zbyt bogatej literatury, a przedstawiane w poszczególnych pracach własności tych strumieni różnią się znacznie między sobą.

W przykładach zastosowań inżynierskich strumienie podwójne występują przede wszystkim w kurtynach powietrznych. Zadaniem kurtyny powietrznej jest oddzielenie dwóch obszarów o różnych temperaturach i ciśnieniach, a czasem również składach mieszanin gazowych. Strumienie podwójne stosowane są w celu zwiększenia skuteczności działania kurtyny, a więc zmniejszenia transportu pędu, ciepła i substancji pomiędzy rozdzielonymi obszarami.

W patentach, na przykład Courtiera [1], podwójny strumień płaski stosowany jest w celu utworzenia kurtyny o zwiększonej skuteczności. Stwier-

dza on, że jeden strumień (wewnętrzny) może być podgrzany i w całości napłynąć do budynku po przeciwnej stronie bramy, podczas gdy drugi strumień (zewewnętrzny, zimny) nie miesza się z pierwszym i pozostaje cały czas poza budynkiem osłaniając strumień wewnętrzny. Podobne zastosowanie podwójnej kurtyny przedstawione zostało w pracy Weissa [2] w opisie nawiewnika sufitowego do sal operacyjnych. Podwójna kurtyna ma tutaj za zadanie lepsze oddzielenie czystej, intensywnie wentylowanej strefy wokół stołu operacyjnego od reszty sali operacyjnej, w której istnieją gorsze warunki mikroklimatyczne i aseptyczne. Badnia za pomocą znaczników gazowych wykazały, że izolacja obu stref przez kurtynę podwójną wynosiła 400:1.

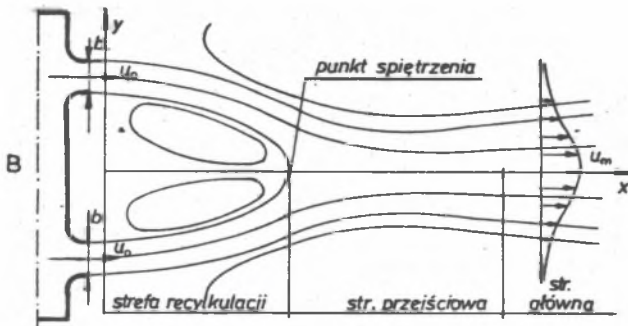
Tak więc w zastosowaniach inżynierskich przyjmowano dotychczas, że:

- dwa równoległe, płaskie strumienie biegą obok siebie i prawie nie mieszają się z sobą;
- wielkości transportowane (ciepło, domieszki) nie przechodzą między strumieniami i w poprzek obu strumieni;
- zjawisko przyjmowane jest za podobne do tego, jakie występuje w wypadku oddziaływania dwóch równoległych strumieni okrągłych [3], [4].

Brak jest metod obliczeniowych rozkładów prędkości, temperatur i koncentracji domieszek, w tym nawet tak podstawowej wielkości jak spadek prędkości w osi strumienia w zależności od odległości od wylotu, a więc możliwości określenia zasięgu płaskiego strumienia swobodnego.

2. WŁASNOŚCI PŁASKIEGO STRUMIENIA PODWÓJNEGO

Literatura dotycząca strumieni podwójnych jest bardzo uboga. Z badań eksperymentalnych Millera i Comingsa [5] oraz Militzera [6] wynika, że bezpośrednio za wylotem z obu otworów szczelinowych następuje ugięcie obu strumieni w kierunku do siebie aż do zetknięcia w punkcie spiętrzenia (PS). Pomiedzy dwoma zakrzywionymi strumieniami znajduje się strefa recyrkulacji z dwoma przeciwbieżnymi wirami. Poza strefą recyrkulacji w strefie przejściowej strumienie łączą się w jeden strumień płaski, który w strefie głównej ma własności podobne jak typowy strumień płaski wypływający ze szczeliny pojedynczej (rys. 1 wraz z oznaczeniami). Jak stwierdził Miller [5], w pełni rozwinięty trubulentny strumień podwójny jest nieodróżnialny od strumienia pojedynczego, wypływającego z odpowiednio umieszczonej szczeliny o zwiększonej szerokości b . Jednak zarówno badania Millera, jak i Militzera prowadzone były dla identycznej, jednej geometrii wylotu $B^+ = B/b = 6$, co uniemożliwia ich ekstrapolację dla innych przypadków. Stosowane metody obliczeniowe albo są bardzo uproszczone, na przykład Militzer adaptuje przybliżone obliczenia strumienia przyściennego przyklejającego się do ściany na skutek efektu Coandy, albo wykorzystują skomplikowane metody numeryczne, a uzyskane wyniki odbiegają od danych eksperymentalnych (Leschziner i Rodi [7]).



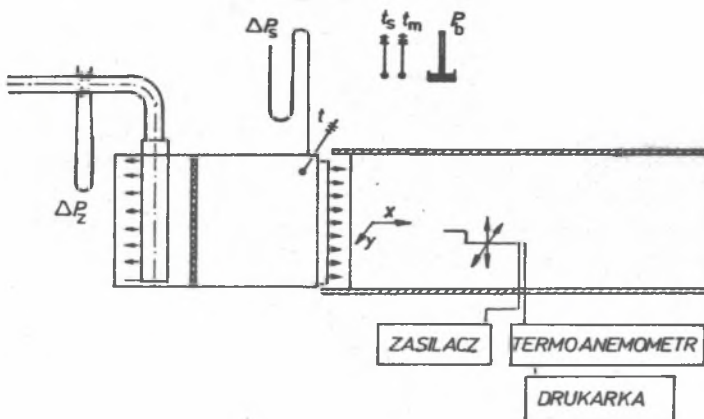
Rys. 1. Strumień podwójny płaski

Fig. 1. Dual plane jet

W celu określenia własności strumieni podwójnych dla różnych geometrii wylotu podjęto prace teoretyczne i eksperymentalne. Po próbie wykorzystania uproszczonego modelu turbulencji swobodnej [8], opracowano model wzajemnego oddziaływania dwóch strumieni płaskich z uwzględnieniem ugięcia strumieni i uzyskano zadowalające wyniki, szczególnie dla strefy recyrkulacji [9]. Model ten jest udoskonalany. Jednocześnie rozpoczęto badania eksperymentalne.

3. STANOWISKO BADAWCZE

Na rys. 2 przedstawiono schemat stanowiska badawczego. Dwa płaskie strumienie powietrza wypływały ze szczelin o długości 610 mm do nierucho-



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego

Fig. 2. Scheme of the experimental stand

meo otoczenia posiadającego tę samą temperaturę. Zmieniano szerokość szczelin $b = 5-20$ mm, ich odległość B oraz prędkość powietrza w przekroju wylotowym w przedziale $2-10$ m/s (co odpowiada $Re = 1 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^4$). Profile prędkości średniej strumienia i składowe pulsacji prędkości mierzone zestawem termooanemometrycznym typu 55M firmy DISA z automatyczną rejestracją uśrednionych wartości. Do pomiarów stosowano sondę walcową warstwową. Błąd pomiaru prędkości w osi strumienia, przy wzorcowaniu sondy i linearyzacji sygnału, był niższy od 2%. Pomiaru na brzegach strumienia, a szczególnie w strefie recyrkulacji i w regionach, gdzie prędkość średnia była bliska zeru, mogą być obciążone znacznie wyższym błędem.

4. WYNIKI POMIARÓW

Wyniki pomiarów przedstawione są z reguły w formie bezwymiarowej, a przyjęto następujące oznaczenia:

$$\begin{aligned} B^+ &= B/b && \text{bezwymiarowy odstęp szczelin} \\ x^+ &= x/b && \text{bezwymiarowa odległość} \\ U^+ &= U_m/U_o && \text{bezwymiarowa prędkość w osi.} \end{aligned}$$

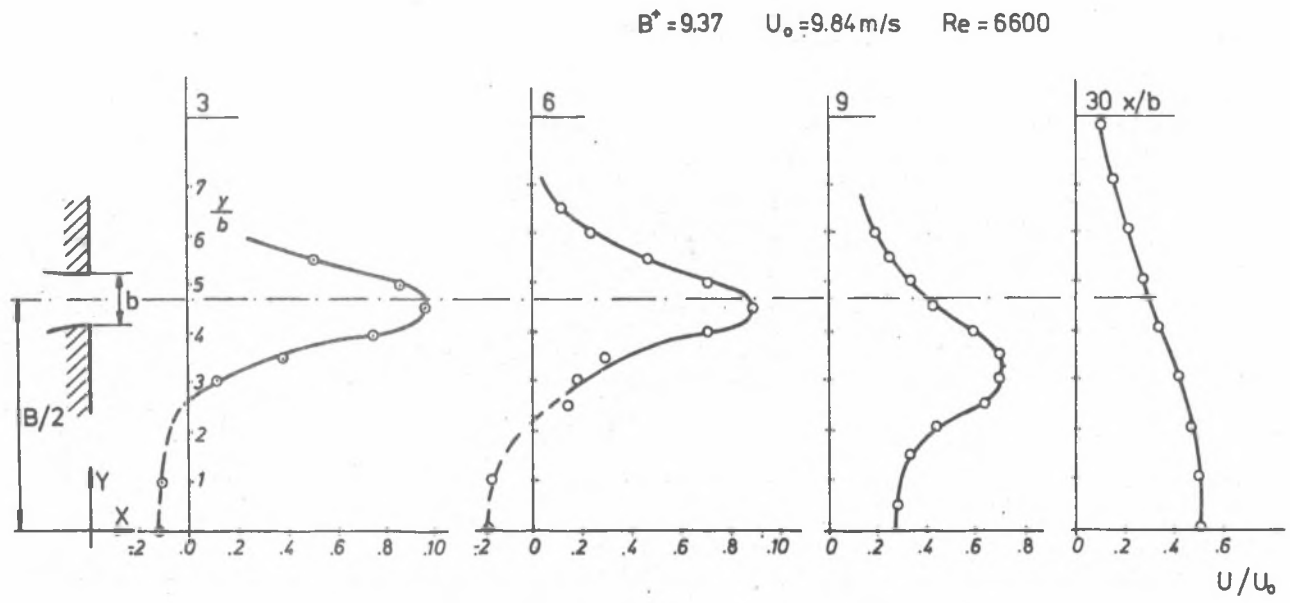
Przykładowe wymiary badanych szczelin przedstawiono w tabl. 1.

Tablica 1

Lp.	b	B	B^+	Oznaczenie
	mm	mm		
1	10,20	95,57	9,37	B_9
2	12,97	92,83	7,16	B_7
3	20,04	85,76	4,28	B_4

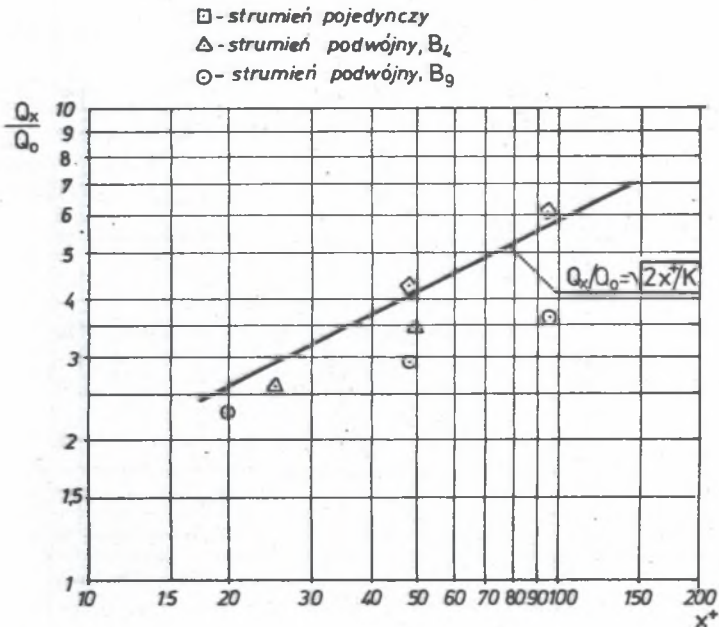
Dla każdego przykładu szczeliny podwójnej badano wpływ ze szczeliny pojedynczej. Pomiaru prowadzono dla trzech różnych liczb Reynoldsa.

Typowe profile poprzeczne prędkości dla szczeliny B_9 przedstawiono na rys. 3, dla prędkości wylotowej $U_o = 9,84$ m/s. Widać wyraźnie przesuwanie się maksimum prędkości w kierunku do osi x , a następnie w większych odległościach typowy profil strumienia swobodnego. Całkowanie tego profilu umożliwia określenie ilości powietrza będącego w ruchu Q_x . W związku z tym że wiarygodne pomiary prędkości mogły być prowadzone tylko do granicy strumienia, dla której prędkość średnia $U_{0,1}$ wynosiła 10% prędkości w osi U_m , obliczono pole pod pozostałą częścią, zakładając profil prędkości jak dla rozkładu normalnego. Dla badanych przypadków zmierzony strumień objętości powietrza Q_x należało zwiększyć o 12% w celu obliczenia



Rys. 3. Profile prędkości w strumieniu podwójnym
 Fig. 3. Velocity profiles in the dual jet

całkowitej ilości powietrza będącego w ruchu. Wyniki obliczeń dla wybranych strumieni podwójnych w porównaniu z danymi dla strumienia pojedynczego przedstawiono na wykresie (rys. 4). Na wykresie podano zależność lokalnej ilości powietrza Q_x odniesionej do początkowego strumienia objętości Q_0 od bezwymiarowej odległości od wylotu. Widać znacznie niższy przyrost objętości strumienia podwójnego niż pojedynczego, czyli niższy wskaźnik przyrostu ilości płynu (entrainment) w strumieniu podwójnym.

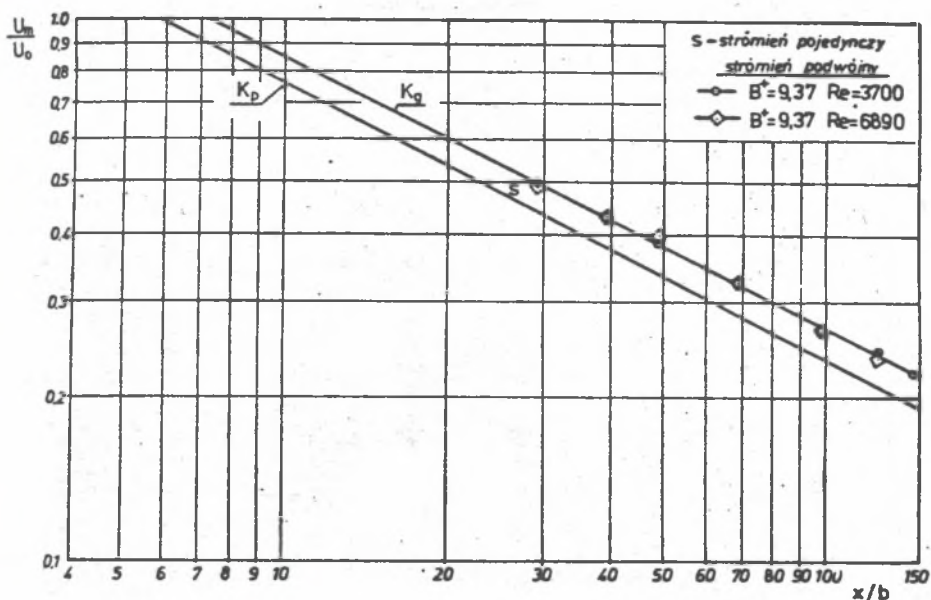


Rys. 4. Wskaźnik przyrostu ilości płynu w strumieniu pojedynczym i podwójnym

Fig. 4. Entrainment rate of the single and dual jet

Skoro profil strumienia podwójnego w strefie głównej jest identyczny jak dla strumienia pojedynczego, należało określić przede wszystkim zależność spadku prędkości w osi U_m od odległości x i geometrii wypływu. Na rys. 5 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów prędkości w osi U_m dla szczeliny pojedynczej i podwójnej, dla różnych liczb Re . Na podstawie wykresu w skali podwójnie logarytmicznej (zależności $U_m/U_0 = f(x/b)$) można ocenić charakterystyczne zachowanie obu strumieni, zaś wychodząc z uproszczonej zależności obowiązującej dla większych odległości od wylotu:

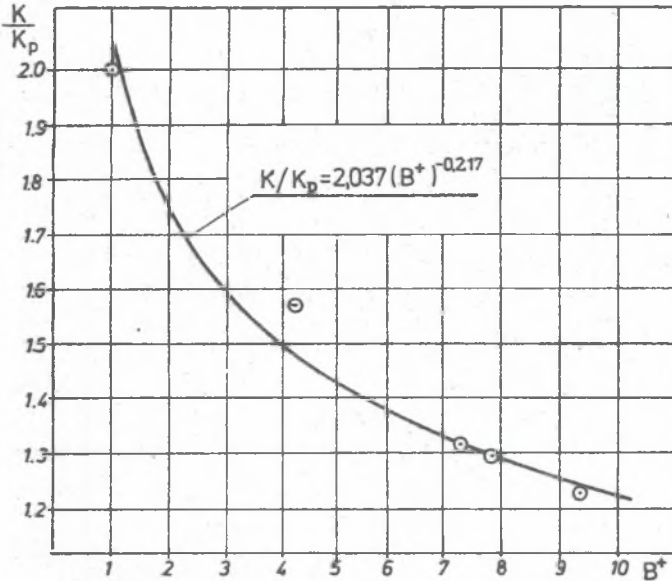
$$\frac{U_m}{U_0} = \sqrt{K \frac{b}{x}} \quad \text{lub} \quad U^+ = (K/x^+)^{1/2} \quad (1)$$



Rys. 5. Prędkości w osi strumienia pojedynczego i płaskiego
 Fig. 5. Centre-line velocity decay for single and dual jet

można opisać spadek prędkości osiowej za pomocą stałej K , będącej bezwymiarową długością tzw. jądra fikcyjnego. Wartości K dla poszczególnych geometrii, każdorazowo dla szczeliny pojedynczej i podwójnej, wyznaczono metodą najmniejszych kwadratów ze zbioru punktów eksperymentalnych. Wynoszą one od 5 do 6,2 dla strumieni pojedynczych i sięgają 9,5 dla strumieni podwójnych.

W celu uogólnienia danych eksperymentalnych powiązано wyniki pomiarów strumienia podwójnego z odpowiadającymi mu strumieniem pojedynczym, którego stałą oznaczono przez K_p od odległości szczelin B^+ dla tej samej szerokości szczeliny b i tego samego ukształtowania wylotu. Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 6. Jeżeli rozpoczniemy analizę od $B^+ = 1$, to znaczy od geometrii, w której dwie szczeliny stykają się ze sobą tworząc faktycznie jedną szczelinę o podwójnej szerokości $2b$, to uzyskamy najwyższą możliwą wartość stosunku K/K_p równą 2. Wynika stąd, że dla takiej szczeliny podwójnej prędkość w osi strumienia w porównaniu ze strumieniem pojedynczym będzie w tej samej odległości od wylotu większa 2 razy. Odsuwanie od siebie szczelin, a więc wzrost parametru B^+ , powodować będzie obniżanie się wartości stałej K . Oznacza to, że w strumie-



Rys. 6. Charakterystyka badanych strumieni podwójnych

Fig. 6. Characteristic feature of tested dual jets

niu podwójnym w strefie głównej prędkość maleje wraz ze zwiększaniem odległości między szczelinami. Otrzymane wyniki aproksymowano funkcją potęgową najmniejszych kwadratów i uzyskano zależność:

$$K/K_p = 2.04 (B^+)^{-0,217} \quad (2)$$

Obowiązuje ona w przedziale wartości bezwymiarowego odstępu szczelin B^+ od 1 do 10 przy założeniu, że dla wartości B^+ mniejszych od 4 charakter zmian parametru K jest podobny. Otrzymana ostateczna zależność jest bardzo ważna dla obliczeń własności strumieni podwójnych w strefie głównej. Badania własne potwierdziły uniwersalność profilu prędkości w strefie głównej strumienia, podobnie jak w strumieniu pojedynczym swobodnym. Na podstawie obliczonej z zależności (2) i (1) prędkości w osi strumienia można określić pozostałe wielkości, jak rozkład prędkości w profilu poprzecznym strumienia czy jego szerokość. Można też obliczyć istotną z inżynierskiego punktu widzenia własność - zasięg, czyli odległość, przy której prędkość spada poniżej pewnej wartości.

5. ZAKOŃCZENIE

W artykule skoncentrowano się na jednej własności rozwiniętego podwójnego przepływu płaskiego, a mianowicie spadku prędkości w osi. Stwierdzono zależność tego spadku od geometrii wylotu, czyli odległości szczelin. Po odniesieniu uzyskanych wyników do odpowiednich danych dla szczelin pojedynczych, uzyskano ogólną zależność dla stałej opisującej spadek prędkości osiowej dla zakresu bezwymiarowego odstępu szczelin B^+ do 10.

Opisane własności uśrednionych parametrów strumienia podwójnego w strefie głównej stanowią tylko część badań tego rodzaju przepływu, obejmujących również strefę recyrkulacji i własności przepływu turbulentnego.

LITERATURA

- [1] Courtier G.A.: Air Curtains. US Patent No. 3172349, March 9, 1965.
- [2] Weiss E.G.: Design Criteria of Air - Conditioning in Hospital Operating Theatres. Part I and II, Aust. Ref. Air Cond. and Heating, Oct. and Nov. 1974.
- [3] Koestel A., Austin J.B.: Air Velocities in Two Parallel Ventilating Jets. Heat Piping and Air Cond., Feb. 1956.
- [4] Ozik W.: Teoria swobodnych strumieni powietrza wzajemnie na siebie oddziaływujących. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Rozprawy nr 51, Poznań 1972.
- [5] Miller D., Comings E.: Force - Momentum Fields in a Dual - Jet Flow. J. Fluid Mech., Vol. 7, 1959, Nr 9, s. 237-256.
- [6] Militzer I.: Dual Plane Parallel Turbulent Jets. Praca dokt. University Waterloo, Kanada 1977.
- [7] Leschziner M.A., Rodi W.: Calculation of Annular and Twin Parallel Jets Using Various Discretization Schemes and Turbulence - Model Variations. ASME J. Fluids Eng., 1981, Vol. 103, s. 352-360.
- [8] Szajner A.: Badania podwójnego płaskiego strumienia swobodnego. (Mat.) XII Zjazd Termodynamików, Kraków - Rytyro 1934.
- [9] Szajner A., Mikielwicz J.: Analiza dwu oddziaływających strumieni swobodnych. (Mat.) Sescja Nauk. Wydz. Bud. Maszyn 40-lecie Pol. Gd., Gdańsk 1985.

ДАЛЬНОСТЬ ДВОЙНОЙ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СВОБОДНОЙ СТРУИ

Резюме

В работе представлено результаты экспериментальных испытаний двойной плоскопараллельной свободной струи для расстояния между приточными отверстиями в пределах до 10 ширины отверстий. Измерения распределений составляющих осевых скоростей дали возможность представить общую зависимость описывающую снижение скорости в оси двойных струй. Сходство профилей скорости в главной зоне предоставляет возможность определить остальные параметры струи. Установлено более низкое локальное количество воздуха в движении, чем в одиночной струе.

THE THROW OF A DUAL FREE JET

S u m m a r y

Experiments have been described in which the dual free jet of the initial separation distance between discharging nozzles up to 10 nozzle width have been tested. Measurements of the axial velocity distributions have allowed to determine the general law of the centre-line velocity decay. Similarity of the velocity profiles in the combined region the jet makes it possible to calculate the other properties of the jet. One of the features of the dual jet is remarkably lower entrainment than those of the single jet.