

Lucjan KURZAK

Instytut Maszyn Ciepłych  
Politechnika Częstochowska

PROCESY TURBULENTNEGO TRANSPORTU  
CIEPŁA W SWOBODNEJ STRUDZE KOŁOWEJ

Streszczenie: W pracy przedstawiono wpływ przegrzewu na ewolucję wybranych wielkości termogazodynamicznych w zawirowanej strudze wypływającej do nieruchomego chłodniejszego ośrodka. Ponadto poddano analizie równania transportu pędu i ciepła w obszarze rozwiniętego przepływu turbulentnego.

Jednym z częściej spotykanych w praktyce przepływów jest nieizotermiczna swobodna struga zawirowana występująca między innymi w różnego typu urządzeniach energetycznych, chemicznych itp. W chwili obecnej brakuje pełnych i usystematyzowanych danych dotyczących ewolucji pól prędkości i temperatury średniej oraz odpowiednich składowych fluktuacyjnych, czego konsekwencją jest nadal niedostateczna informacja o procesach turbulentnego transportu pędu i ciepła. Spotykana w literaturze przewaga materiału doświadczalnego nad opracowaniami teoretycznymi jest efektem złożoności zjawiska i związanych z tym trudności w jego dostatecznie ścisłym, analitycznym opisie [1,2].

Transport pędu i ciepła w przepływie płynu nieściśliwego o stałej lepkości i przewodności cieplnej opisany jest przez klasyczne równania Navier'a-Stokesa i Kirchoffa-Fouriera, które wraz z przynależnym równaniem ciągłości ustalają związki między czasowymi i przestrzennymi zmianami prędkości i temperatury płynącego medium. Ograniczony rozważania dla przepływu płynu nieściśliwego, co jest założeniem dopuszczalnym przy małych prędkościach przepływu i niezbyt silnej niejednorodności pola temperatur. Wprowadzając związki:

$$U = \bar{U} + u ; \quad \theta = \bar{\theta} + \psi$$

oraz pomijając wyrazy, których wpływ zgodnie z [5] może być zaniedbany, omawiane wyżej równania transportu w swobodnej zawirowanej strudze kołowej (rys. 1) zapisane być mogą w postaci:

$$u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_r \frac{\partial u_x}{\partial r} = - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{u}_x \bar{u}_r) \quad (1.a)$$

$$\frac{u_x^2}{r} = \frac{1}{g} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{u}_r^2) - \frac{\bar{u}_r^2}{r} \quad (1.b)$$

$$U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + U_r \frac{\partial U_x}{\partial r} + \frac{U_x U_r}{r} = - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \overline{U_r U_r}) \quad (1.c)$$

$$U_x \frac{\partial \theta}{\partial x} + U_r \frac{\partial \theta}{\partial r} = - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \overline{U_r \theta}) \quad (1.d)$$

$$\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r U_r) = 0 \quad (1.e)$$

Dla bliższego poznania ewolucji poszczególnych wielkości występujących w powyższych równaniach wykonano pomiary wszystkich składowych prędkości oraz temperatury zarówno średnich, jak i turbulentnych. Badaniom poddano swobodną strugę zawirowaną ( $S_0=0,13$ ;  $Re_d = \frac{U_{zd}}{\nu} = 8 \cdot 10^4$ ), wypływającą do nieruchomego, zimniejszego ośrodka. Zmienny przegrzew strugi określony w przekroju wylotowym z dyszy jako nadwyżka temperatury strugi w stosunku do temperatury otoczenia ( $\Theta_0 = T_0 - T_{ot}$ ) był ustalany na zmiennym poziomie, wynoszącym  $\Theta_0 = 0; 20; 30; 40; 50$  deg. Do wyznaczania wartości poszczególnych wielkości średnich i fluktuacyjnych używano trójkanałowego zestawu termooanemometrycznego DISA 55. System oraz pięćotworkowej sondy pneumatycznej.

Uzyskane z pomiarów wielkości, przedstawione szczegółowo w pracy [4,5], pozwoliły na analizę ich ewolucji zarówno w kierunku przepływu, jak również w kolejnych przekrojach pomiarowych. Ze wszystkich występujących w równaniach (1a-e) wielkości tylko iloczyn  $\overline{U_x U_r}$  i  $\overline{U_r \theta}$  oraz składowa osiowa  $U_x$  prędkości średniej wykazują istotną zależność od temperatury w zakresie stosowanych przegrzewów strugi.

Biorąc ponadto pod uwagę fakt, że turbulentny transport pędu i ciepła jest szczególnie intensywny w kierunku, w którym notuje się największe gradienty prędkości i temperatury średniej w dalszej analizie szczególną uwagę poświęcono równaniom (1a i d).

Z rys. 2 wynika, że wzrost przegrzewu powoduje podwyższenie poziomu naprężeń stycznych  $\overline{U_x U_r}$ , przy jednocześnie niewielkim przesunięciu ich maksimum w kierunku osi X. Naprężenia te związane są z korelacją bezpośrednio z polem prędkości średnich, co wynika z równania (1a), które zapisano przykładowo dla osi strugi przyjmując postać:

$$-U_{xm} \frac{\partial U_{xm}}{\partial x} = \left[ \frac{\partial (\overline{U_x U_r})}{\partial r} \right]_{r=0} \quad (2)$$

Ze wzrostem  $\Theta_0$  rośnie więc wyraźnie prawa strona powyższego związku, przy czym jak wynika z rys. 3 maleje prędkość średnia  $U_{xm}$  w osi strugi oraz wzrasta bezwzględna wartość pochodnej  $\frac{\partial U_{xm}}{\partial x}$  (rys. 4).

Ponieważ z drugiej strony strumień masy

$$\dot{m}(\theta)_{x=idem} = 2\pi \int_0^{\infty} \rho U_x r dr \quad (3)$$

jest lekko rosnącą funkcją przegrzewu (rys.5), dlatego też szybszemu zmniejszaniu się prędkości średniej w osi strugi musi towarzyszyć wzrost jej wymiarów w poprzecznych, co widoczne jest na omawianym rys. 3.

Równanie (1d) wyrażające zmienność prędkości i temperatury przyjmując w osi strugi postać:

$$-U_{xm} \frac{\partial \theta_m}{\partial x} = \left[ \frac{\partial (\overline{U_r \psi})}{\partial r} \right]_{r=0} \quad (4)$$

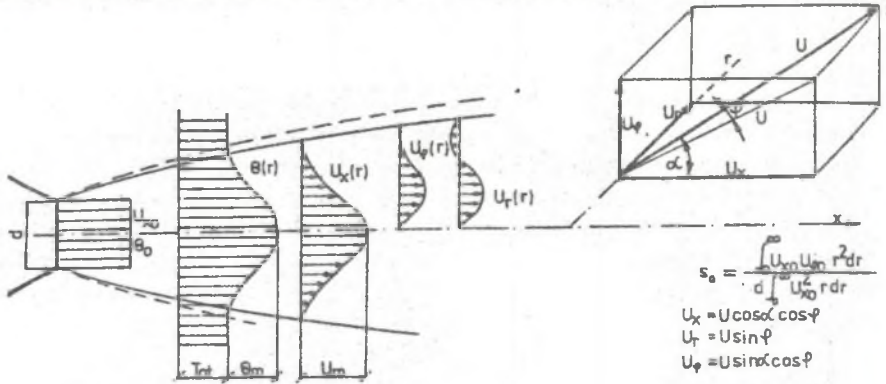
Na rys. 6 przedstawiono wpływ  $\theta_0$  na ewolucję turbulentnego strumienia ciepła w kierunku poprzecznym do przepływu średniego. Z rysunku tego widać, że wzrost przegrzewu zwiększa wartość  $\overline{U_r \psi}$  w pobliżu osi strugi, co oznacza znaczny wzrost prawej strony równania (5). Ponieważ jak stwierdzono uprzednio, prędkość  $U_{xm}$  mierzona w osi strugi maleje ze wzrostem przegrzewu, dlatego spełnienie powyższego równania wymaga zwiększenia bezwzględnej wartości pochodnej  $\frac{\partial \theta_m}{\partial x}$ , co potwierdza rys. 7. Ponieważ struga nie wykazuje istotnych strat ciepła do otoczenia [5], oczywistym staje się fakt, że spłaszczeniu krzywej  $\theta(r)$  musi towarzyszyć wzrost szerokości pola temperatur średnich (rys. 9).

Interesująca może być również kontrola zastosowanych uproszczeń, które doprowadziły równania transportu do analizowanych tu postaci (1). Wykorzystując wyniki badań odpowiadające obszarowi rozwiniętego przepływu turbulentnego ( $x/d = 9$ ) na rys. 10 i 11 naniesiono w tym celu promieniowe rozkłady poszczególnych wyrazów równań 1a i 1d. Pola zakreskowane przedstawiają tu odpowiednie "dopełnienia", które bilansują analizowane równania transportu, ujmując w sobie jednocześnie możliwe błędy pomiarów. Niewielka wartość dopełnienia rzędu kilku procent weryfikuje przyjęty sposób uproszczeń równań transportu, wskazując również na zadowalającą dokładność przeprowadzonego eksperymentu.

Przedstawiony materiał doświadczalny potwierdza przypuszczenie, że wpływ stopnia przegrzewu na termogazodynamiczne parametry strugi wywierany jest głównie za pośrednictwem iloczynów korelacyjnych  $\overline{U_r U_r}$  i  $\overline{U_r \psi}$ , przy czym globalnym efektem ich wzrostu jest przyspieszone ujednorodnianie się pól prędkości i temperatur średnich.

#### Literatura

- [1] Achmedov R.B.: Aerodinamika zakręconej strugi - wyd. ENERGIA, 1977.
- [2] Curtet R.M., Darigol M. - Aerothermique d'un Jet Libre Tournant Turbulent, Preprint, Institute de Mecanique, Grenoble, 1978.
- [3] Elsner J.W.: Turbulencja przepływów /książka złożona w wydawnictwie/
- [4] Elsner J.W., Kurzak L.: Ewolucja nieizotermicznej zawirowanej strugi osiowo-symetrycznej. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Nr 22, 1982.
- [5] Kurzak L.: Turbulentna dyfuzja ciepła w swobodnej osiowo-symetrycznej strudze. Praca doktorska, Politechnika Częstochowska IMC, 1982.



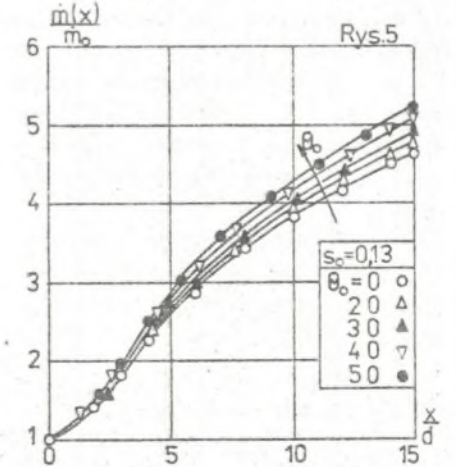
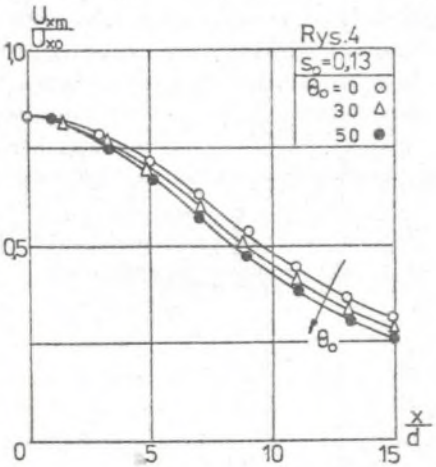
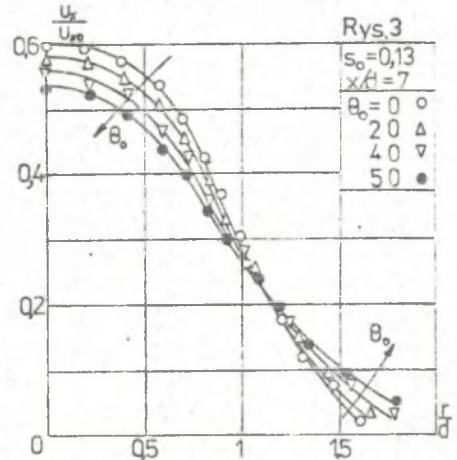
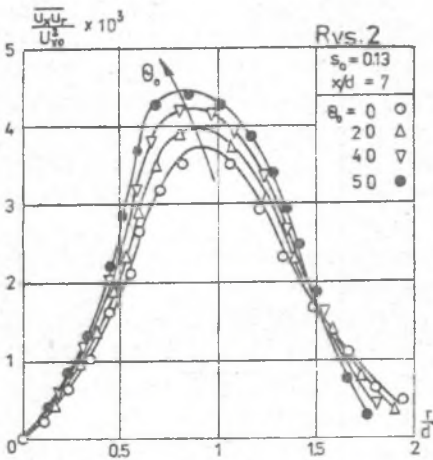
$$s_0 = \frac{\int_0^{d/2} U_{x0} U_y r^2 dr}{d \int_0^{d/2} U_{x0}^2 r dr}$$

$$U_x = U \cos \alpha \cos \varphi$$

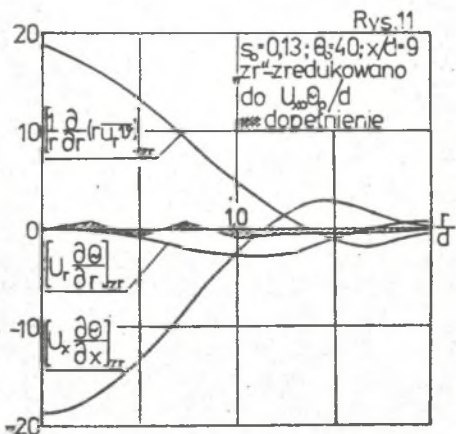
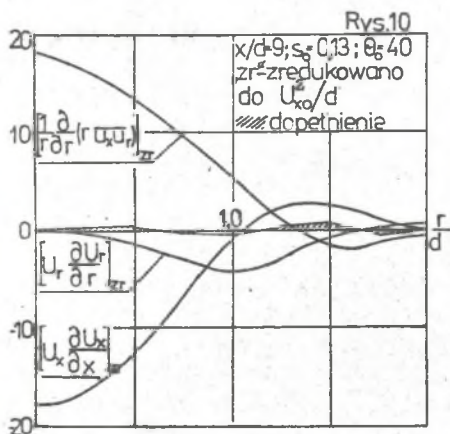
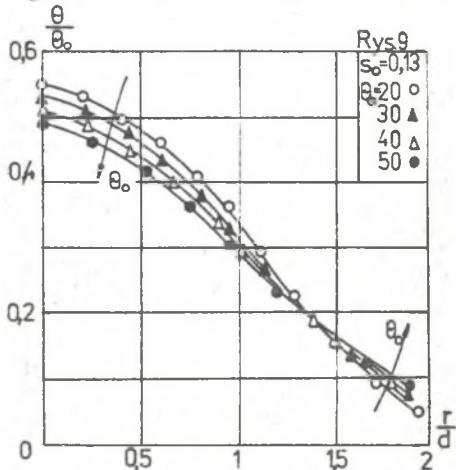
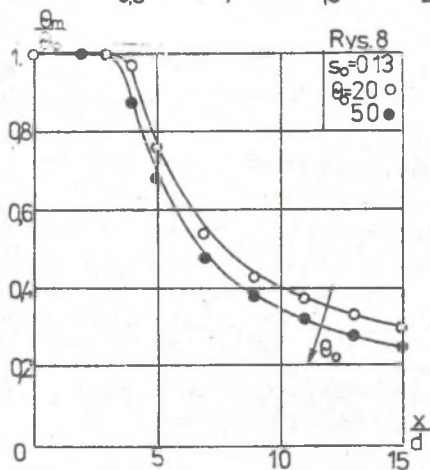
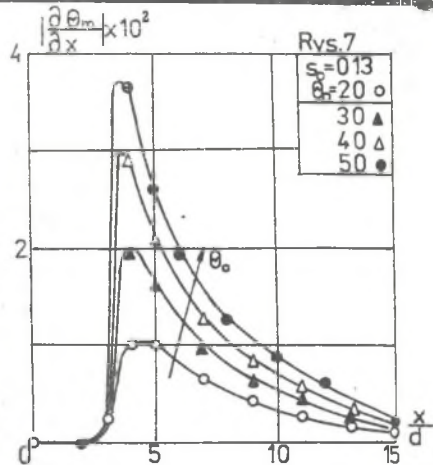
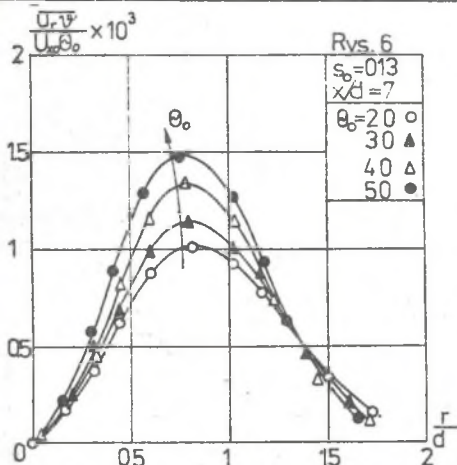
$$U_y = U \sin \varphi$$

$$U_z = U \sin \alpha \cos \varphi$$

Rys.1







ПРОЦЕССЫ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА В СВОБОДНОЙ  
ОСЕСИМЕТРИЧНОЙ СТРУЕ

Р е з ю м е

В работе представлено влияние перегрева на эволюцию совбравных термогазо-динамических величин завихренной струи истекающей в неподвижное пространство. Сделано анализ уравнения транспорта импульсов и тепла в области развитого турбулентного течения.

THE TURBULENT TRANSPORT  
OF HEAT IN THE ROUND FREE JET

S u m m a r y

The paper presents the influence of the initial jet overheat exerted upon the evolution of the characteristics of the round, free swirling jet issuing into the cool, ambient fluid. An analysis of the turbulent momentum and heat equation in the fully developed turbulent flow has been presented as well.