

Mieczysław ŚWIĘTOCHOWSKI

Instytut Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów  
Politechniki Wrocławskiej

## OPIS TEORETYCZNO-EMPIRYCZNY AERODYNAMIKI STRUMIENIA GAZÓW W POZIOMEJ KOMORZE WIROWEJ O DWUSTRONNYM WYPŁYWIE

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono próbę opisu matematycznego przepływu w poziomej komorze wirowej o dwustronnym wypływie dla warunków izotermicznych. Zależności wyprowadzone na drodze teoretycznej zweryfikowano i uzupełniono na drodze doświadczalnej.

### 1. WSTĘP

Obecny stan wiedzy jest niewystarczający dla otrzymania w miarę dokładnych obliczeń na drodze teoretycznej turbulентnego przepływu, a tym bardziej przepływu ze spalaniem. Na podstawie teoretycznej można ustalić jednak zasadnicze czynniki wpływające na spalanie mieszanki pyło-powietrznej, zaś na podstawie oddzielnego badania tych czynników próbować można przewidzieć efekt ich współdziałania. Takim zasadniczym czynnikiem jest między innymi aerodynamika przepływu. Ze względu na duże trudności badań rzeczywistego wysokotemperaturowego i zapyłonego strumienia w wstępnej fazie pracy należy wykorzystać wnioski ze znacznie prostszych badań izotermicznych.

### 2. MECHANIZM PRZEPLYWÓW

W następstwie stycznego wprowadzenia powietrza do komory cylindrycznej wymuszany jest jego wirowy przepływ w przestrzeni komory ze złożonym przestrzennym profilem pola prędkości. Strumień powietrza determinowany kołowym kształtem ścianki komory płynie dalej w głąb komory po torze spiralnym, zbliżając się do osi komory. Na cząstki powietrza poruszające się w przybliżeniu po torach kołowych działa siła odśrodkowa, która w stanie ustalonego przepływu wywołuje specyficzny rozkład ciśnień. Ciśnienie maleje w sposób ciągły wzdłuż promienia komory od wartości maksymalnej nadciśnienia przy ścianie do znacznego podciśnienia w osi komory. Obecność niższego ciśnienia w strefie przyosiowej komory wirowej niż w

przestrzeni, do której odbywa się wypływ, jest powodem istnienia wyraźnego prądu powietrza skierowanego z zewnątrz do środka komory. W następstwie intensywnej wymiany masy, między współśrodkowymi pierścieniowymi warstwami powietrza, następuje wciągnięcie doasanej masy powietrza w ruch wirowy.

Ważną własnością przepływu w komorze wirowej jest duża intensywność pulsacji składowych prędkości. Wysoki poziom turbulencji strumienia wyjaśnia intensywność mieszania się paliwa i powietrza, a następnie efektywność samego procesu spalania. Poziom intensywności pulsacji w komorze wirowej jest wielokrotnie wyższy niż w zwykłych komorowych paleniskach kotłowych. Miarą intensywności turbulencji przepływu jest wartość współczynnika względnej turbulენტnej lepkości  $\bar{V}_T = \frac{\bar{V}_T}{V}$ . Obliczona na podstawie eksperymentalnych danych [4] wartość liczbowa  $\bar{V}_T$  dla przepływu w komorze wirowej jest rzędu  $\bar{V}_T \approx 10^3$  w strefie przystiennej i quasipotencjalnej oraz  $\bar{V}_T \approx 10^5 \div 10^6$  w strefie quasistatycznego przepływu.

### 3. UPROSZCZONY OPIS MATEMATYCZNY PRZEPLYWU

W literaturze źródłowej brak jest jednolitego i zweryfikowanego teoretycznego opisu mechanizmu przepływu płynu w komorze wirowej. Wynika to z trudności analitycznego ujęcia ruchu turbulენტnego płynu rzeczywistego, który to ruch jest w istocie swym ruchem nieustalonym. Wskazana przez Reynoldsa metoda uproszczonego rozwiązywania równań Naviera-Stokesa, polegająca na wydzieleniu prędkości głównych i pobocznych, jest w istocie teorią półempiryczną, wymagającą dla uzyskania konkretnych rozwiązań liczbowych danych doświadczalnych, oddzielnych dla każdego rozpatrywanego rodzaju przepływu. Można jednak otrzymać tą drogą ogólne postacie matematycznych zależności a występujące w nich stałe należy wyznaczyć doświadczalnie. Z drogi takiej skorzystano przy opisie przepływu w komorze wirowej o dwustronnym wypływie.

Punktem wyjściowym był układ równań stacjonarnego przepływu lepkiego, nieściśliwego płynu, zapisanych we współrzędnych cylindrycznych  $x, r, \varphi$  [5]. Wykorzystując charakterystyczne własności przepływu w komorze wirowej, które zostały stwierdzone doświadczalnie, wprowadzono następujące uproszczenia:

- ze względu na symetryczność przepływu względem osi komory opuśczone człony zawierające pochodne cząstkowe  $\frac{\partial}{\partial \varphi}$ ,
  - wykorzystując zależność  $W_r \ll W_x \ll W_\varphi$  oraz  $\frac{\partial}{\partial x} \ll \frac{\partial}{\partial r}$  pominięto równanie z członami  $W_x$  z układu równań wyjściowych,
- następnie wydzielaając prędkości poboczne /pulsacje/ od prędkości głównych otrzymano uproszczone równania turbulენტnego przepływu dla komory wirowej w postaci:

$$\begin{aligned} w_r \frac{\partial \bar{w}_r}{\partial r} - \frac{\bar{w}_\varphi^2}{r} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left( \frac{\partial^2 \bar{w}_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{w}_r}{\partial r} - \frac{\bar{w}_r}{r^2} \right) + \frac{\bar{w}_r^2}{r} + \frac{\bar{w}_\varphi^2}{r}, \\ \bar{w}_r \frac{\partial \bar{w}_\varphi}{\partial r} + \frac{\bar{w}_r \bar{w}_\varphi}{r} &= \nu \left( \frac{\partial^2 \bar{w}_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{w}_\varphi}{\partial r} - \frac{\bar{w}_\varphi}{r^2} \right) - \frac{\partial}{\partial r} (\bar{w}_\varphi' \bar{w}_r') - 2 \frac{\bar{w}_\varphi' \bar{w}_r'}{r}. \end{aligned} \quad (1)$$

Równanie (1) uzupełniono równaniem ciągłości przepływu w kierunku promieniowym

$$\frac{\partial w_r}{\partial r} + \frac{w_r}{r} = 0. \quad (2)$$

Wprowadzając oznaczenie składowej turbulენტnego naprężenia

$$\tau_{\varphi r} = -\rho w_\varphi' w_r' \quad (3)$$

i zakładając w oparciu o półempiryczną teorię turbulencji [2], że

$$\tau_{\varphi r} = \frac{\varepsilon}{\rho} r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{w_\varphi}{r} \right) \quad (4)$$

oraz opierając się na wynikach pracy [5], że

$$w_\varphi' \approx w_r'$$

określono składową turbulენტnej pulsacji w postaci:

$$w_\varphi' = \sqrt{\varepsilon r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{w_\varphi}{r} \right)}. \quad (5)$$

Rozwiązując równanie (1) i (2) z wykorzystaniem zależności (5) otrzymano ogólne postacie równań opisujących rozkład składowej obwodowej prędkości przepływu (6) oraz ciśnienia statycznego (7) w funkcji promienia komory

$$w_\varphi = w_{\varphi m} \left( \frac{r_{\varphi m}}{r} \right)^n, \quad (6)$$

$$p = p_R - B_1 \left( \frac{1}{r^{2n}} - \frac{1}{R^{2n}} \right) - B_2 \left( \frac{1}{r^{(n+1)}} - \frac{1}{R^{(n+1)}} \right), \quad (7)$$

$$\text{gdzie: } B_1 = \frac{\rho w_{\varphi m}^2 r_{\varphi m}^{2n}}{2n},$$

Równania (6) i (7) ważne są dla obszaru quasipotencjalnego przepływu /czyli dla zakresu promienia  $r_{\varphi m} \ll r \leq R/$ .

Dla obszaru quasistałego korzystać można z wystarczającą dokładnością z zależności charakterystycznych dla płaskiego ruchu wirowego opisanego równaniami:

$$W_{\varphi} = \omega \cdot r, \quad (8)$$

$$P = P_{ot} - \rho \frac{\omega^2}{2} (r_{po}^2 - r^2),$$

gdzie:  $\omega = \frac{W_{\varphi m}}{r_{\varphi m}}$  - prędkość kątowa w jądrze wiru.

#### 4. WERYFIKACJA DOŚWIADCZALNA

Przeprowadzone badania doświadczalne [6] pozwoliły na uściślenie opisu struktury przepływu wewnątrz komory wirowej o dwustronnym wypływie poprzez powiązanie wielkości występujących w równaniach (6), (7), (8) z parametrami geometrycznymi i eksploatacyjnymi komory. I tak do zakresu przeprowadzonych badań ( $\frac{L}{D} = 1,0 \div 1,8$ ;  $\frac{D_2}{D} = 0,2 \div 0,6$ ;  $\frac{F_w}{F_c} = 0,07 \div 0,32$ ) można je przedstawić w postaci:

- wykładnik potęgowy w równaniu [6] dla obszaru quasipotencjalnego

$$n = (1,03 - 0,925 D_g/D) \left(\frac{L}{D}\right)^{0,15}; \quad (9)$$

$$n = 0,4 - 0,9$$

dla obszaru przyosiowego  $n \approx -1$ ,

- maksymalna wartość składowej obwodowej prędkości,

$$W_{\varphi m} = 0,78 W_w \sqrt{\frac{P_{sw}}{\frac{1}{2} \rho W_w^2}} \quad (10)$$

gdzie:  $W_w, P_{sw}$  - prędkość i ciśnienie statyczne w dyszy wlotowej komory,

- promień, na którym prędkość obwodowa osiąga wartość maksymalną

$$r_{\varphi m} = r_g \left(1,2 - 2 \frac{F_w}{F_c}\right) \left(\frac{L}{D}\right)^{-0,3} \quad (11)$$

$$r_{\varphi m} = (0,7 - 1,0) r_g$$

gdzie:  $r_g$  - promień otworu wylotowego komory

- stała  $B_2$  w równaniu (7)

$$B_2 = 2,17 \left(\frac{D_g}{D}\right)^{-0,5} \left(\frac{R_w}{F_c}\right)^{-0,2} \left(\frac{L}{D}\right)^{-0,4} \quad (12)$$

$$B_2 = 1,2 - 2,7$$

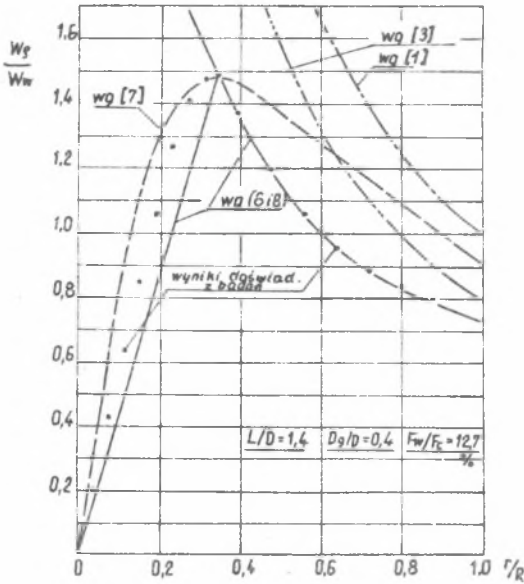
- promień, dla którego ciśnienie statyczne wewnątrz komory osiąga wartość ciśnienia otoczenia

$$r_{po} = r_g \left(0,09 \frac{L}{D} + 0,9\right) \left(\frac{F_w}{F_c}\right)^{-0,2} \quad (13)$$

$$r_{po} = (0,55 - 0,7) r_g$$

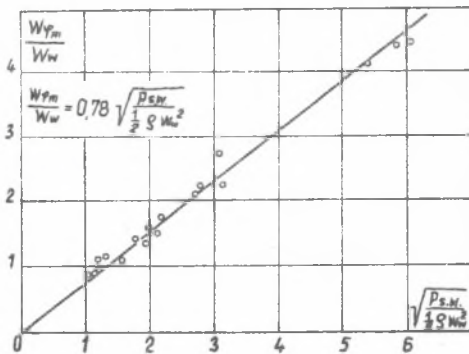
Równania (6), (7) i (8) otrzymane na drodze teoretycznej, uzupełnione zależnościami empirycznymi (9) ÷ (13), odzwierciedlają rzeczywisty rozkład prędkości i ciśnień wzdłuż promienia komory z wystarczającą dla celów praktycznych dokładnością.

Na rysunkach 1, 2 i 3 porównano poszczególne wielkości wyliczone z przedstawionych formuł (linie ciągłe) z danymi pomiarowymi (punkty). Pozostałe linie zostały otrzymane z zależności podawanych w literaturze.



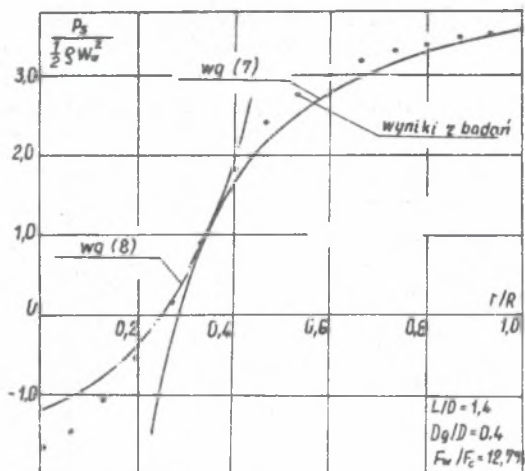
Rys.1. Porównanie rozkładu składowej obwodowej prędkości  $W_\varphi$  w funkcji promienia komory.

Fig.1. Comparison the distribution of tangential velocity  $W_\varphi = f(r)$  with experimental data.



Rys.2. Zależność maksymalnej wartości bezwymiarowej prędkości obwodowej od bezwymiarowego ciśnienia statycznego w dyszy wlotowej dla całego zakresu badawczego.

Fig.2. Dependence of the maximum value of dimensionless tangential velocity as the function of dimensionless static pressure at an inlet nozzle of chamber.



Rys. 3. Porównanie rozkładu ciśnienia statycznego  $p = f(r)$  wg zależności (7) i (8) z danymi pomiarowymi

Fig. 3. Comparison the distribution of static pressure  $p = f(r)$  with experimental data

Istotnym elementem charakteryzującym własności przepływowe urządzenia jest jego opór aerodynamiczny. Znajomość wartości oporu aerodynamicznego w zależności od parametrów geometrycznych komory jest niezbędna dla prawidłowego wyboru konstrukcji w równym stopniu jak znajomość rozkładu prędkości i ciśnień w komorze.

Dla celów porównawczych opór aerodynamiczny komory cyklonowej wyrażono w postaci bezwymiarowej:

$$\zeta_{xsr} = \frac{\Delta p_c}{\frac{1}{2} \rho W_{xsr}^2} \quad (14)$$

gdzie:  $W_{xsr} = \frac{4\bar{v}_c}{\pi D^2}$  jest średnią obliczeniową prędkością osiową w przekroju komory cyklonowej.

Tak obliczona prędkość wiąże w sobie dwa podstawowe parametry konstrukcyjno-eksploatacyjne komory - całkowite natężenie przepływu powietrza  $\bar{v}_c$  i średnicę komory cyklonowej  $D$ . Wyrażony równaniem (14) współczynnik oporu jednoznacznie określa względny opór aerodynamiczny komory cyklonowej niezależnie od jej parametrów geometrycznych /długość, powierzchnia otworu wylotowego i powierzchnia dysz wlotowych/.

Na podstawie przeprowadzonych badań ustalono zależność współczynnika oporu komory wirowej od jej parametrów geometrycznych w postaci:

$$\zeta_{xsr} = 495,2 \left( \frac{D}{D} \right)^{-1,757} \left( \frac{F_{w1}}{F_c} \right)^{-0,849} \left( \frac{L}{D} \right)^{-0,425}$$

## Podsumowanie

- Otrzymane formuły opisujące aerodynamikę strumienia gazów są słuszne w zakresie zmian parametrów geometrycznych komory objętych badaniami, czyli:
  - względna średnica otworów wylotowych  $\frac{D}{D} = 0,2 - 0,6$ ,
  - względna powierzchnia dysz wlotowych  $\frac{F_{w1}}{F_c} = 0,12 - 0,32$ ,
  - względna długość komory  $\frac{L}{D} = 1,0 - 1,8$ .
- Na podstawie przedstawionych zależności można określić podstawowe cechy przepływowe komory już w fazie projektowania.

## LITERATURA

- [1] Ambranovič G.N., Teoria centrobieżnej forsunki Vsb. Promyšlennaja aerodynamika, Moskwa 1954.
- [2] Bukowski J., Mechanika płynów. PWN, Warszawa 1976.
- [3] Ljachovskij D.N., Isledovanije aerodynamičeskoj struktury potoka v ciklonnoj kamere. Voprosy aerodynamiki i teplopieredači v kotielno-topočnoj procesach, G.E.J., 1958.
- [4] Reznjekov A.B., Ustimienko B.P., Teplotehničeskije osnovy ciklonnych procesov. Izd. "Naŭka", Aima-Ata 1974.
- [5] Švab V.A., K voprosu obobščenijsja polej skorosti turbulentnovo potoka v ciklonnoj kamere. Inžinerijnofizičeskij žurnal, 1963, Nr 2.
- [6] Świętochowski M., Zamojdo R., Badania własności przepływowych oryginalnej komory wirowej o dwustronnym wpływie gazów, VI Konferencja Kotłowa.
- [7] Valis L.A. Ustimienko B.P., Ob aerodynamike ciklonnoj topočnoj kamery. Teploenergetika, 1964, Nr 9.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Tadeusz CHMIELNIAK

ТЕОРЕТИКО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ АЭРОДИНАМИКИ  
ЦИКЛОННОЙ КАМЕРЫ С ДВУХСТОРОННИМ ВЫХОДОМ ГАЗА

Резюме

В работе описаны результаты теоретико-экспериментальных исследований аэродинамики изотермического однофазного газового потока в циклонной камере с двухсторонним выходом.

Приближенное аналитическое решение общих уравнений стационарного движения вязкой несжимаемой жидкости в цилиндрических координатах  $x, r, \varphi$  дает общие зависимости профилей тангенциальной компоненты скорости и статического давления в функции радиуса камеры. Постоянные величины в этих зависимостях получены в результате обработки значительного числа опытных данных. Сопоставление результатов расчета с опытными данными показывает, что полученное решение качественно правильно отражает сложную структуру потока в циклонной камере.

THEORETICAL AND PRACTICAL DESCRIPTION OF AERODYNAMICS OF  
ISOMETRIC FLOW IN A ROTARY CHAMBER WITH TWO-SIDED OUTFLOW

Summary

In the paper the results of theoretical and practical investigations upon the aerodynamics of isothermic flow in a rotary chamber are presented. An approximate solution of a set of equations for the flow of a real fluid in a rotary chamber have given analytical formulae for the distribution of tangential velocity of flow and static pressure as a function of a radius of a rotary chamber.

The constant values appearing in those formulae were found experimentally. The obtained results of the investigations allow one to complete the theoretical description of flow phenomena occurring in the chamber on the basis of additional equations obtained experimentally.