ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1990
Seria: ENERGETYKA z. Nr kol. 1101

Mieczysław ŚWIĘTOCHOWSKI
Rudolf ŻAMOJDO

Instytut Techniki Cieplnej i Mechaniki Płynów
Politechniki Wrocławskiej

BADANIA WŁASNOŚCI PRZEPŁYWOWYCH ORYGINALNEJ KOMORY WIROWEJ O DWUSTRONNYM WYPŁYWIE GAZÓW

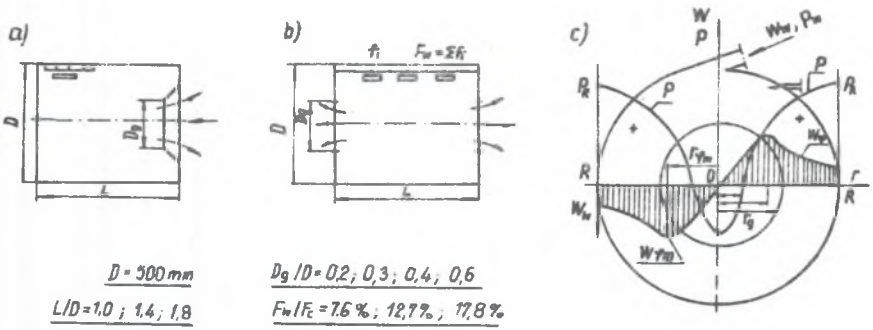
Streszczenie. W pracy podano niektóre wyniki badań nad aerodynamiką prototypowej poziomej komory wirowej /cyklonowej/ z dwustronnym wypływem czynnika. Przedstawiono też porównanie podstawowych własności badanej komory ze znaną komorą o jednostronnym wypływie.

1. WSTĘP

Paleniska cyklonowe realizujące wirowy przepływ czynników biorących udział w procesie spalania stosowane są od ponad 40 lat. Opinie na temat ich przydatności w procesie spalania zmieniały się w czasie dość znacznie. Od bardzo pozytywnych w pierwszym okresie do negatywnych na przełomie lat siedemdziesiątych i osiemdziesiątych. W pierwszym okresie eksponowano takie cechy paleniska, jak: wyższą sprawność, wysokie 80-95% związanie popiołu w postaci ciekłej, co pozwalało na stosowanie dużych prędkości spalin w kanałach konwekcyjnych, niskie zapylenie spalin. O pozytywnej ocenie tych palenisk świadczy też to, że pomimo większej komplikacji w eksploatacji w porównaniu do palenisk komorowych zastosowano je w świecie w ponad 600 kotłach dużej wydajności. Główną przyczyną obniżenia popularności palenisk wirowych była wysoka emisja NO_x. Przy nadmiarze powietrza n= 1,1 i temperaturze spalania t_{sp} = 1900-2200°C emisja NO_x przekraczała 2000 mg/m^3. Obecnie wydaje się, że spalanie w komorach wirowych odzyska swą popularność. Potwierdza to najnowsza technologia spalania przy substechiometrycznym udziale powietrza (ok. 70% powietrza niezbędnego do spalania paliwa), w procesie spalania przedstawiona przez amerykańską firmę TRW [1]. Technologia ta wykorzystuje jako element podstawowy komorę wirową. Wg firmy TRW technologia ta zapewnia oprócz wymienionych już pozytywnych cech cyklonów drastyczne ograniczenie wiązania się azotu w tlenki oraz wiązanie SO_2 zawartego w spalinach w palenisku kotła. Technologia ta, jeśli chodzi o czystość spalin, wg twórców jest konkurencyjna nawet dla kotłów fluidalnych.

Wadą dotychczas nie wyeliminowaną w znanych paleniskach cyklonowych jest zwiększone zużycie energii elektrycznej na napęd urządzeń podmuchowych w następstwie wysokiego oporu aerodynamicznego.

Przedstawiona w niniejszej pracy konstrukcja komory wirowej o dwustronnym wypływie czynnika [2] zachowując wszystkie zalety znanych komór cyklonowych posiada znacznie mniejszy opór aerodynamiczny.



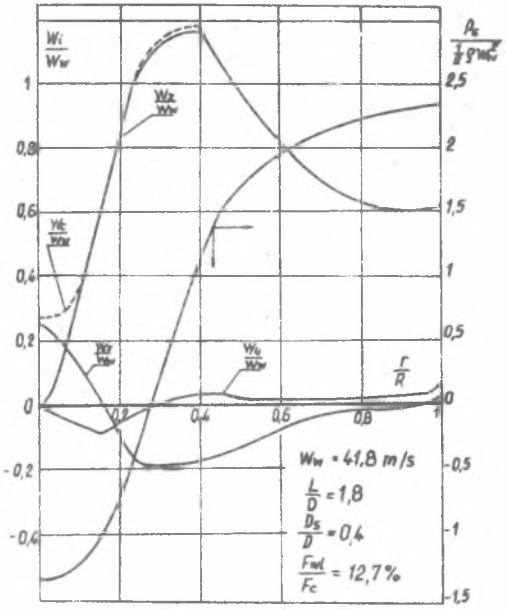
Rys.1. Komora cyklonowa: a/ z jednostronnym wylotem, b/ z dwustronnym wylotem, c/ przykładowy rozkład prędkości i ciśnień w przekroju.

Fig.1. Cyclon chamber: a/ with one-sided autflow, b/ with two-sided autflow, c/ the example of velocity and pressure distributions in the chamber section.

2. OGÓLNA STRUKTURA PRZEPŁYWU W KOMORZE CYKLONOWEJ O DWUSTRONNYM WYPŁYWIE CZYNNIKA

Przeprowadzone badania potwierdzają, że podstawową składową prędkości przepływu gazu w komorze jest składowa obwodowa, wartość, której wzrasta od ścianki w kierunku osi komory, osiągając maksymum na pewnym promieniu $r_{\varphi m}$ i dalej maleje praktycznie liniowo do zera w osi komory cyklonowej- rys. 2.

Krzywe zmian prędkości całkowitych i ich składowe obwodowe pokrywają się prawie wzdłuż całego promienia komory, dla wszystkich przebadanych wariantów konstrukcyjnych komory. Tylko w obszarze przyosiowym zauważa się pewne różnice między nimi, gdyż tu zauważalne wartości osiąga składowa osiowa prędkości. Wartość prędkość obwodowej w objętości i w pobliżu ścianek komory cyklonowej ma decydujący wpływ na warunki jej pracy. Z jednej strony uwarunkowuje zdolność separacyjną strumienia, z drugiej ma istotny wpływ na opór aerodynamiczny komory. Prócz tego gradient wzdłuż promienia prędkości obwodowej określa turbulentność strumienia, a co za tym

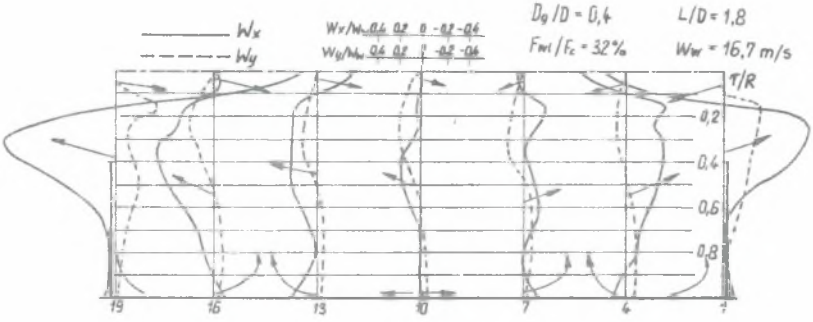


Rys. 2. Rozkład prędkości i ciśnień w komorze cyklonowej dla przykładowo wybranego przekroju pomiarowego.

Fig. 2. Velocity and pressure distributions in the cyclon chamber.

idzie i intensywność procesów przekazywania ciepła i wymiany masy oraz spalania paliwa w komorze.

Składowa osiowa prędkości, poza obszarem przyosiowym, jest wielokrotnie mniejsza od składowej obwodowej. Jednak rozpływ strumieni powietrza w komorze, określany zmianą prędkości osiowej W_x w przekrojach poprzecznych komory cyklonowej, istotnie wpływa na organizację procesu spalania, rys. 3.



Rys. 3. Rozkład prędkości osiowej W_x (linie ciągłe) i prędkości promieniowej W_r (linie przerywane) w przestrzeni komory

Fig. 3. Distribution of axial velocity and radial velocity (dashed lines) in the chamber

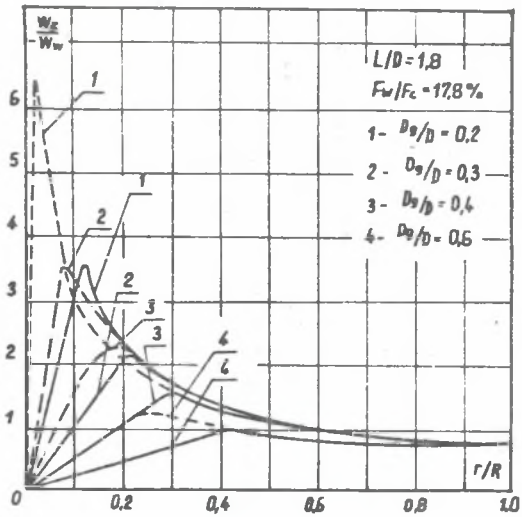
Składowa osiowa prędkości zmienia w zależności od promienia i przekroju pomiarowego zarówno wielkość, jak i znak. W rezultacie w komorze obserwujemy różne kierunki przemieszczania się masy powietrza, co znacznie komplikuje dokładne opisanie struktury strumienia w cyklonie. Na podstawie analizy przeprowadzonych badań można wnioskować, że rozpływ powietrza w komorze cyklonowej zależy przede wszystkim od miejsca wzdłuż tworzącej komory usytuowania dysz wlotowych. Rozpływy czynnika przedstawione na rys. 3 dotyczą wariantu o rownomiernym zasilaniu wzdłuż długości komory. Zauważyć tu można symetrię rozpływu powietrza względem środkowego przekroju komory. W strefie przyściennej główne masy powietrza płyną do dwóch "pierścieni wirowych" umieszczonych w odległości około $\frac{1}{4}$ L od den wylotowych. Niewielka część dostarczonego powietrza spływa wzdłuż den w kierunku wylotu. W wymienionych pierścieniach wirowych należy się spodziewać zwiększonej koncentracji paliwa. W podstawowej objętości komory powietrze płynie po stożkowych torach śrubowych w kierunku den wylotowych. W strefie przyosiowej obserwuje się dość znaczne strumienie powietrza powrotnego do wnętrza komory.

Składowa promieniowa prędkości W_r w większej części komory jest pomijalnie mała w porównaniu z W_φ względnie z W_x, rys. 3. Wyjątek stanowią obszary w pobliżu ścian wylotowych, w których W_r wyraźnie rośnie. W obszarze quasipotencjalnego przepływu składowa promieniowa skierowana jest od ścianki do środka komory, osiągając zerową wartość na granicy quasistałej strefy przepływu, w której przybiera kierunek przeciwny. Wyjątkiem są warstwy w pobliżu ścian wylotowych, w których składowa prędkości W_r prawie wzdłuż całego promienia komory jest skierowana od ścianki do osi.

3. WPŁYW PARAMETRÓW GEOMETRYCZNYCH KOMORY WIROWEJ NA JEJ AERODYNAMIKĘ

Na rys. 1 podano zakres zmian podstawowych parametrów konstrukcyjnych komory wirowej, dla których przeprowadzono badania. Na aerodynamikę komory wirowej zasadniczy wpływ ma przede wszystkim względna średnica otworu wylotowego, D_g/D oraz względna powierzchnia wlotu, F_{wl}/F_c. Mniejsze znaczenie ma względna długość komory L/D.

Przy zmniejszaniu względnej średnicy otworu wylotowego szybko wzrasta maksymalna wartość prędkości obwodowej przesuwając się do środka komory, rys. 4. Wartość tej prędkości w strefie przyściennej komory praktycznie się nie zmienia. Największy wpływ parametr D_g/D ma na opór aerodynamiczny komory (rys. 5). Ze zmniejszaniem wartości D_g/D opór bardzo szybko rośnie. Stąd wniosek, że parametr D_g/D nie ma istotnego wpływu na warunki spalania pyłu w strefie przyściennej komory, natomiast ma decydujący wpływ na zdolności separacyjne komory oraz na jej opór aerodynamiczny. Dla komór wirowych o dwustronnym wypływie zalecać można



Rys. 4. Rozkład składowej obwodowej prędkości w przekroju komory jednostronnej (linie przerywane) i dwustronnej (linie ciągłe).

Fig. 4. Distribution of trangential velocity in the chamber with two-sided autflow and with one-sided outflow (dashed lines).

wartości D_g/D w zakresie 0,3-0,5.

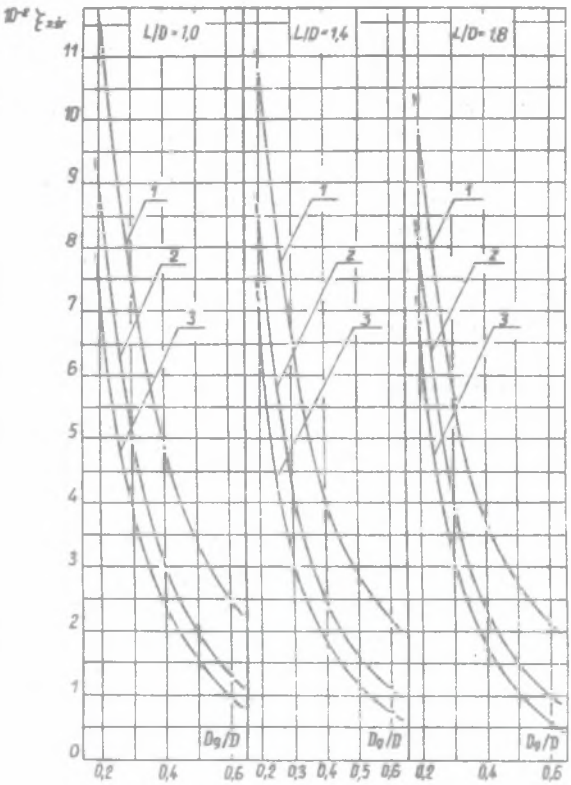
Zmniejszenie względnej powierzchni dysz wlotowych do komory F_{wl}/F_c, co przy stałej ilości doprowadzanego powietrza prowadzi do zwiększenia prędkości wlotowej, powoduje pewien wzrost składowej obwodowej prędkości w quasipotencjalnym obszarze przepływu (rys. 6a). Z punktu widzenia procesu spalania jest to zjawisko korzystne. Jednak równocześnie znacznie wzrasta ciśnienie statyczne w strefie przyściennej, rys. 6b, a jeszcze bardziej wzrasta całkowity opór aerodynamiczny przepływu.
Prawidłowa konstrukcja komory wirowej powinna odpowiadać dwom podstawowym wymaganiom: minimalnej wartości oporu aerodynamicznego i maksymalnemu zachowaniu krętu prędkości w komorze w stosunku do krętu prędkości wlotowej wyrażonym współczynnikiem zachowania prędkości wlotowej .

$$\varepsilon = \frac{W_\varphi \cdot r}{W_w \cdot R} = \left(\frac{W_\varphi}{W_w}\right)_{r=R}$$

Badania wykazały, że wartość współczynnika ε zależy bardzo wyraźnie od względnej powierzchni wlotu $\frac{F_w}{F_c}$ oraz od względnej długości komory $\frac{L}{D}$, rys. 7. Nie zależy natomiast od natężenia przepływu płynu przez komorę ani też od średnicy komory. Również parametr $\frac{D_g}{D}$ ma niewielki wpływ na ε.

Dla badanej komory ε przybierało wartości w bardzo szerokich granicach, w zależności od parametrów geometrycznych komory $(\varepsilon = 0,38 - 0,98)$.

Z analizy powyższych własności wynika, że przy projektowaniu komory cyklonowej nie należy dążyć do nadmiernie dużych prędkości wlotowych, co równoznaczne jest z małymi wartościami $\frac{F_{wl}}{F_c}$, gdyż wpływa to na znaczny

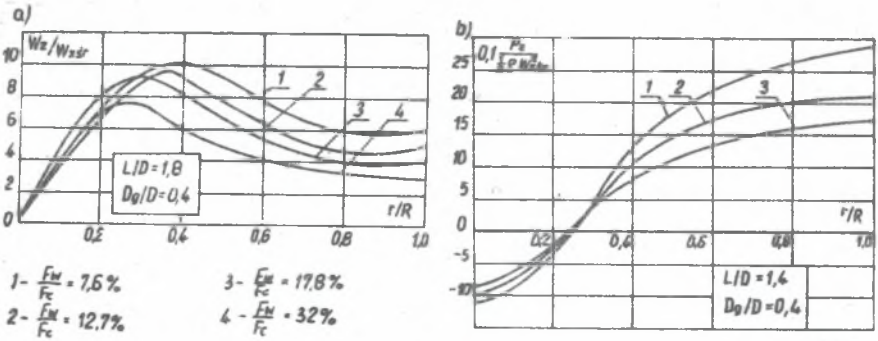


Rys. 5. Zależność współczynnika oporu komory cyklonowej z dwustronnym wypływem od parametrów geometrycznych.

Fig. 5. Resistance coefficient for the chamber with two-sided outflow as a function of its geometrical parameters.

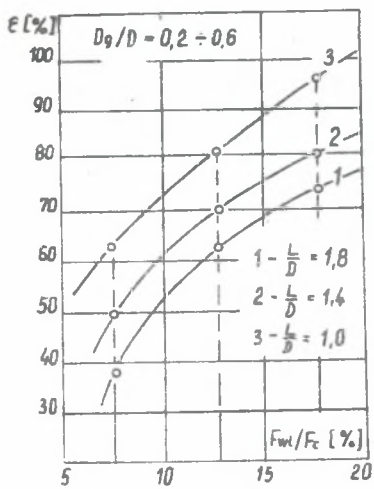
wzrost oporu przepływu w komorze a w małym stopniu ma wpływ na wielkość prędkości obwodowej przy ścianie komory. Bezwzględna wartość prędkości obwodowej przy ścianie komory zależy przede wszystkim od stosunku natężenia przepływu płynu do przekroju poprzecznego komory. Badania wykazały, że nadmiar energii kinetycznej w strumieniu wlotowym zamienia się w komorze zaraz za wlotem w energię potencjalną, oczywiście ze znaczną stratą. Dlatego przy projektowaniu komór cyklonowych prędkości wlotowej nie należy traktować jako parametru wyjściowego (co stosuje się dotychczas), a należy zapewnić taką powierzchnię dysz wlotowych, aby ε było zbliżone do 1.

Wybór niezbędnej wartości składowej prędkości obwodowej W_φ w przestrzeni komory wirowej powinien być dokonany z warunków związanych z pro-



Rys. 6. Rozkład składowej obwodowej prędkości (a) oraz ciśnienia statycznego (b) w przekroju komory w zależności od względnej powierzchni dysz wlotowych.

Fig. 6. Distribution of tangential velocity (a) and static pressure (b) in the chamber section as a function of dimensionless area of the inlet nozzle of a chamber.



Rys. 7. Współczynnik zachowania prędkości wlotowej w funkcji parametrów geometrycznych komory.

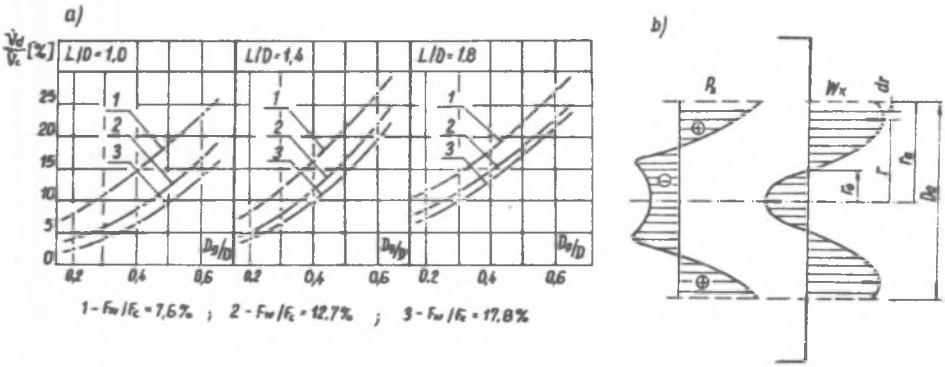
Fig. 7. Coefficient of conservation of inlet velocity as a function of geometrical parameters of a chamber.

cesem spalania. Minimalna wartość W_φ określona jest wymaganym efektem separacji pyłu, zaś wartość maksymalna z warunku zachowania ciekłej warstewki szlaki na ściankach, zrywanej przy nadmiernie dużych prędkościach.

Za optymalne wartości względnej powierzchni dysz wlotowych dla komór cyklonowych o dwustronnym wypływie, uznać należy wartości w zakresie 0,15 - 0,20.

W strefie przyosiowej komory dla $r < r_{po}$ znajduje się obszar podciśnień, najbardziej wyraźnie widoczny w przekrojach oddalonych od wylotów.

W pobliżu wylotu wartość podciśnienia wyraźnie zmniejsza się wskutek osiowego dossania powietrza do objętości komory. Osiowy prąd powrotny w miarę przesuwania się w głąb komory, na skutek intensywnej turbulentnej wymiany masy z otaczającym go silnie zawirowanym strumieniem, stopniowo wciąga się w ogólny ruch obrotowy i zanika. Intensywność prądu powrotnego zależy zdecydowanie od parametrów geometrycznych komory. Ilość dossanego powietrza rośnie ze wzrostem D_9/D i L/D, a maleje ze wzrostem F_w/F_o. W zakresie objętym programem badawczym wynosiło 2,5-27 % ilości powietrza podstawowego, rys. 8.



Rys. 8. Masa powietrza dossanego do komory w funkcji jej parametrów geometrycznych (a) oraz przykładowy rozkład prędkości osiowej i ciśnienia statycznego w otworze wylotowym komory (b).

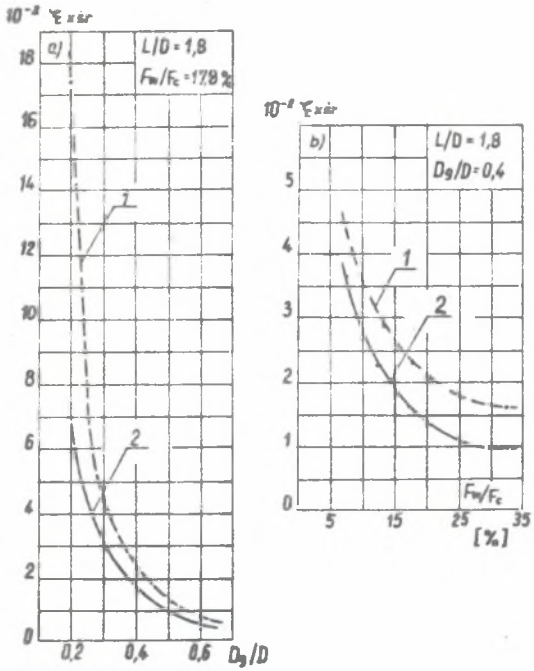
Fig. 8. Mass of air aspirated to a chamber as a function its geometrical parameters (a), the example of the distribution of axial velocity and static pressure in the outlet nozzle of a chamber.

4. ANALIZA PORÓWNAWCZA WŁASNOŚCI PRZEPŁYWOWYCH BADANEJ KOMORY WIROWEJ ZE ZNANĄ KOMORĄ O JEDNOSTRONNYM WYPŁYWIE.

Badania porównawcze komór cyklonowych z dwustronnym i jednostronnym wypływem przeprowadzono na tym samym stanowisku badawczym, z zachowaniem tych samych parametrów geometrycznych komór oraz przy tym samym i stałym natężeniu przepływu powietrza.

Na rysunku 9 zestawiono wartości współczynników oporu $\zeta_{xśr}$ dla obu typów komór przy różnych parametrach geometrycznych. Współczynnik oporu aerodynamicznego $\zeta_{xśr}$ komory cyklonowej o dwustronnym wypływie jest wyraźnie niższy, co szczególnie uwidacznia się dla małych wartości stosunku D_6/D.

W związku z tym w komorach o dwustronnym wypływie dzięki znacznie mniejszym wartościom współczynnika oporu aerodynamicznego mogą być stosowane mniejsze względne średnice otworów wylotowych D_9/D, co zdecydo-



Rys. 9. Porównanie współczynników oporu aerodynamicznego komory jednostronnej (linie przerywane) i dwustronnej (linie ciągłe)

Fig. 9. Comparison of the resistance coefficient for two chambers with two-sided and one-sided outflow

wanie poprawia skuteczność separacji cząstek paliwa na ścianki komory.

Nie mniej ważną cechą, obok wartości oporu aerodynamicznego, charakteryzującą pracę paleniska cyklonowego, jest intensywność ruchu wirowego określona rozkładem prędkości obwodowych wzdłuż promienia komory cyklonowej.

Dla obu rozważanych typów komór cyklonowych odpowiadające prędkości obwodowe w podstawowej przestrzeni komory są równe (rys. 4). Maksymalne wartości prędkości obwodowych co prawda są większe w komorze cyklonowej jednostronnej, lecz osiągane są one na pograniczu osiowego wiru powrotnego. Natomiast w obszarze podstawowego wiru wylotowego prędkości obwodowe a tym samym i zdolności separacyjne dla obu typów komór są w zasadzie równe.

5. PODSUMOWANIE

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują na możliwość wpływania w znacznym zakresie na kształt pól prędkości i ciśnień w przestrzeni komory poprzez dobór odpowiednich parametrów geometrycznych komory. Dobór konkretnych wartości tych parametrów zależy od przeznaczenia i wymagań stawianych dla projektowanej konstrukcji komory.

Przedstawiona konstrukcja komory wirowej o dwustronnym wypływie czynnika przy porównywalnych własnościach technologicznych ze znanymi komorami jednostronnymi posiada wyraźnie mniejszy opór aerodynamiczny.

LITERATURA

[1] Slagging combustors to challang fluid beds for new, retrofits jobs, Power, sierpień 1987 r.

[2] Żamojdo R., Patent nr 104841 z dnia 10.06.1964 r.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Tadeusz CHMIELNIAK

ИССЛЕДОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ В ЦИКЛОННОЙ КАМЕРЕ
С ДВУХСТОРОННИМ ВЫХОДОМ ГАЗА

Р е з ю м е

В работе описана структура течения газа в новой конструкции циклонной камеры с двухсторонним выходом. Известные циклонные камеры имеют выход газов только с одной стороны.

Полученные результаты исследований дали возможность описать структуру течения газа в циклонной камере в широком диапазоне изменений ее геометрических параметров.

В работе описано профили компонент скорости и статического давления в сечениях уциклонной камеры, аэродинамического сопротивления, коэффициента снижения скорости, а также правила рациональной организации ввода воздуха.

Сопоставление результатов исследований циклонных камер с двухсторонним выходом газа и с односторонним выходом газа показывает, что новая конструкция имеет значительно меньшее аэродинамическое сопротивление, чем односторонняя камера.

INVESTIGATIONS UPON THE AERODYNAMICS OF ISOTERMIC FLOW IN A CYCLON CHAMBER WITH TWO-SIDED AUTFLOW OF GASES

S u m m a r y

In the paper a prototype cyclon chamber with two-sided outflow of working medium is considered. Cyclon chambers that have been so far used have output from one side only. The obtained results of investigation allow one to describe the structure of flow of medium inside a cyclon chamber, in the wide range of changes of its geometrical parameters. Those results also have given the information about the possibilities of forming the aerodynamics of a chamber flow that is by forming the distribution of velocity and pressure fields, the flow resistance of a chamber and its parts changing its geometrical parameters.

The results are presented of comparative experiments of cyclons with two-sided and on-sided outflow of a medium. Analysing the results obtained one can find out that the two-sided outflow cyclon chamber has a lower resistance coefficient than a one-sided outflow cyclon chamber with the same intensity of rotary motion in chamber.