

PAULINA KOSOWSKA*

PRZEPŁYW POWIETRZA W KANAŁE Z PŁASKĄ
PRZEPUSTNICĄ JEDNOPŁASZCZYZNOWĄ
CZEŚĆ II: OBLICZENIA NA PODSTAWIE
KOMPUTEROWEGO MODELOWANIA DYNAMIKI
PRZEPŁYWU POWIETRZA I BADANIA
NA STANOWISKU LABORATORYJNYM

AIR FLOW IN A VENTILATION DUCT WITH
A PLANE DAMPER
PART II: COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS
ANALYSIS OF AIR FLOW AND TESTS
IN THE LABORATORY

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki obliczeń momentu obrotowego powstającego w osi przepustnicy przeprowadzone w oparciu o model numeryczny 2D zjawiska fizycznego polegającego na przepływie powietrza przez przepustnicę jednopłaszczyznową umieszczoną w kanale wentylacyjnym. Wartości obliczone porównano z wynikami pomiarów uzyskanymi na stanowisku laboratoryjnym. Poszukiwano zależności prędkości powietrza od momentu obrotowego oraz kąta położenia przepustnicy. W artykule przedstawiono również możliwości wykorzystania modelu do dalszych prac.

Słowa kluczowe: przepływ powietrza, wentylacja, klimatyzacja, modelowanie CFD, zawór motylowy

Abstract

The paper presents the calculation results of torque that is formed in damper's axis of rotation, performed based on 2D numerical model of physical phenomena involving the flow of air through the plane damper placed in the ventilation duct. The values calculated were compared with results obtained in laboratory measurements. Air velocity dependence of the torque and angle of damper position was investigated. The paper also presents the possibility of using the model for further work.

Keywords: air flow, ventilation, air-conditioning, CFD modeling, butterfly valve

* Dr inż. Paulina Kosowska, Instytut Inżynierii Ciepłej i Ochrony Powietrza, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

Oznaczenia

- D – wymiar kanału (2D) [m],
 \vec{F} – siła aerodynamiczna [N],
 \vec{F}_p – składowa siły aerodynamicznej kształtowana przez ciśnienie [N],
 \vec{F}_∞ – składowa siły aerodynamicznej kształtowana przez lepkość płynu [N],
 L – wymiar przepustnicy (2D) [m],
 O – środek obrotu przepustnicy,
 P – ciśnienie [Pa],
 r – długość ramienia na jakim działa siła aerodynamiczna [m],
 R^2 – współczynnik determinacji,
 v – średnia masowa prędkość powietrza [m/s],
 α – położenie przepustnicy [°],
 μ – lepkość dynamiczna powietrza [kg/(m·s)],
 ρ – gęstość powietrza [kg/m³],
 $\vec{\tau}$ – moment obrotowy [Nm],

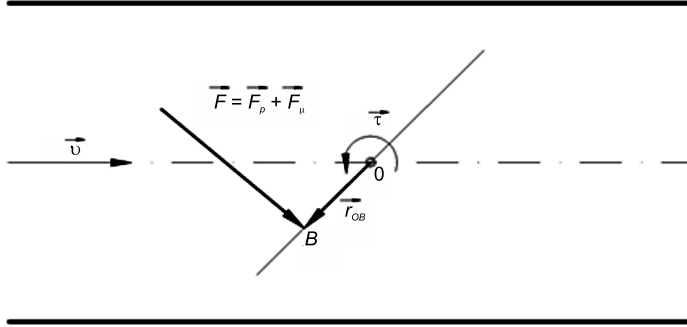
1. Wstęp

Podstawowym zadaniem płaskich przepustnic jednopłaszczyznowych jest regulacja strumienia powietrza przepływającego w instalacji wentylacyjnej lub klimatyzacyjnej w oparciu o pomiar strumienia przepływającego powietrza. W obecnie stosowanych rozwiązaniach sygnał pomiarowy pochodzi z dodatkowego urządzenia umieszczanego przed przepustnicą, takiego jak np. zwężka pomiarowa, krzyż pomiarowy lub listwa pomiarowa. Ten dodatkowy element jest źródłem strat ciśnienia, co w przypadku rozległej instalacji wyposażonej w wiele regulatorów przepływu, pociąga za sobą zwiększenie kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych wynikających z zastosowania większych wentylatorów. Istotną sprawą staje się również dokładność pomiaru na takim elemencie, gdzie duży wpływ na pomiar ma niezaburzony profil prędkości wymagający długich odcinków prostoliniowych przed i za elementem pomiarowym, co w przypadku dużych sieci jest bardzo trudne lub wręcz niemożliwe do spełnienia.

Wykorzystanie elementu regulacyjnego do pomiaru strumienia przepływającego powietrza pozwoliłoby wyeliminować istniejące niedogodności. Ogólna koncepcja przepustnicy pomiarowo-regulacyjnej opiera się na zjawisku powstawania momentu obrotowego $\vec{\tau}$ w osi przepustnicy O na skutek działania sił aerodynamicznych \vec{F} oddziałujących na powierzchnię przepustnicy (rys. 1). Składowe siły aerodynamicznej działającej na powierzchnię przepustnicy zależą od prędkości i właściwości płynu (gęstość, lepkość), kształtu przepustnicy, a także od kąta jej nachylenia oraz lokalizacji środka obrotu. Znalezienie zależności prędkości powietrza w kanale od momentu obrotowego oraz położenia przepustnicy stwarza możliwość wykorzystania sygnału momentu obrotowego do pomiaru natężenia przepływu powietrza.

2. Wyznaczanie momentu obrotowego na podstawie obliczeń numerycznych

Moment obrotowy powstający w osi przepustnicy (rys. 1) liczony był jako suma momentu wynikającego z sił ciśnienia oraz sił lepkości, według formuły (1) [1].



Rys. 1. Moment siły względem osi obrotu przepustnicy

Fig. 1. Moment of force at damper's axis of rotation

$$\underbrace{\vec{\tau}_{OB}}_{\text{moment siły}} = \underbrace{\vec{F}_p \times \vec{r}_{OB}}_{\text{moment siły ciśnienia}} + \underbrace{\vec{F}_\mu \times \vec{r}_{OB}}_{\text{moment siły lepkości}} \quad (1)$$

Człony wzoru (1) wyznaczane są z zależności (2) oraz (3) odpowiednio dla sił kształtowanych przez ciśnienie oraz lepkość:

$$\vec{F}_p = \sum_{i=1}^m P_i \cdot A_i \times \vec{n}_{p,i} \quad (2)$$

$$\vec{F}_\mu = \sum_{i=1}^m \mu_i \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial n} \right)_i \cdot A_i \times \vec{n}_{\mu,i} \quad (3)$$

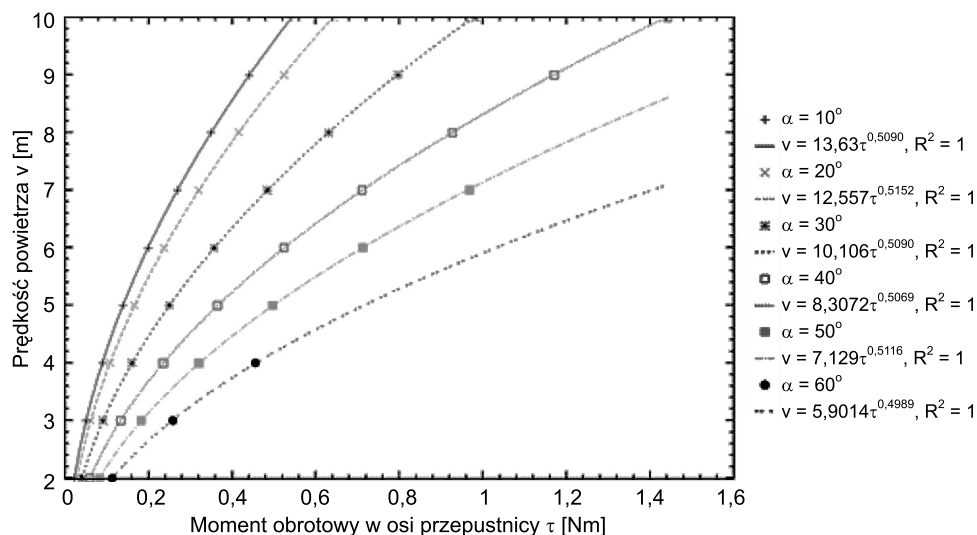
gdzie:

- P_i – ciśnienie całkowite działające na powierzchnię i -tego elementu przylegającą do przepustnicy,
- A_i – powierzchnia i -tego elementu leżącego na przepustnicy (iloczyn długości odcinka na przepustnicy oraz założonej głębokość G przepustnicy w modelowaniu 2D = 1 m),
- $\vec{n}_{p,i}$ – wektor normalny do powierzchni i -tego elementu przylegającego do przepustnicy,
- $\vec{n}_{\mu,i}$ – wektor styczny do powierzchni i -tego elementu przylegającego do przepustnicy,
- m – ilość elementów na powierzchni przepustnicy,
- μ_i – lepkość dynamiczna obliczona dla powierzchni i -tego elementu przylegającego do przepustnicy,

$\left(\frac{\partial v}{\partial n}\right)_i$ – gradient prędkości w kierunku normalnym do powierzchni i -tego elementu przylegającej do przepustnicy, na długości równej wysokości elementu.

W tym miejscu należy zwrócić uwagę na to, że w badanym zjawisku, w badanych warunkach (temperatura powietrza = 20°), moment siły stanowiący pochodną sił lepkości był bardzo mały w stosunku do całkowitego momentu, co dobrze ilustruje następujący przykład [2]: w 55 przypadkach na 63 składowa „lepkościowa” momentu stanowiła część mniejsza od promila momentu sumarycznego, a wielkości ekstremalne rzędu 1,4‰ charakterystyczne były dla małych prędkości powietrza i małych kątów α , co dobrze oddaje zagadnienie większej grubości warstwy przyściennej – w stosunku do przepływu powietrza z większymi prędkościami – związanej z szerszym obszarem dominacji sił lepkości. Wpływ prędkości na udział członu „lepkościowego” zauważalny był dla każdego położenia przepustnicy, przy czym im większy kąt α , tym udział ten był mniejszy.

Na podstawie obliczeń przeprowadzonych według wytycznych zawartych w artykule *Przepływ powietrza w kanale z płaską przepustnicą jednopłaszczyznową. Część I: Model numeryczny 2D* (s. 91-107 w tej publikacji) wykonano wstępną analizę szukanej zależności $v(\tau, \alpha)$. Wyniki ilustruje rys. 2, na którym punktami oznaczono wyniki symulacji dla kątów α .



Rys. 2. Zależność prędkości przepływu powietrza v od momentu obrotowego τ powstającego w osi płaskiej przepustnicy jednopłaszczyznowej dla różnych kątów α (2D)

Fig. 2. Torque at damper's axis of rotation τ versus air flow velocity v (2D)

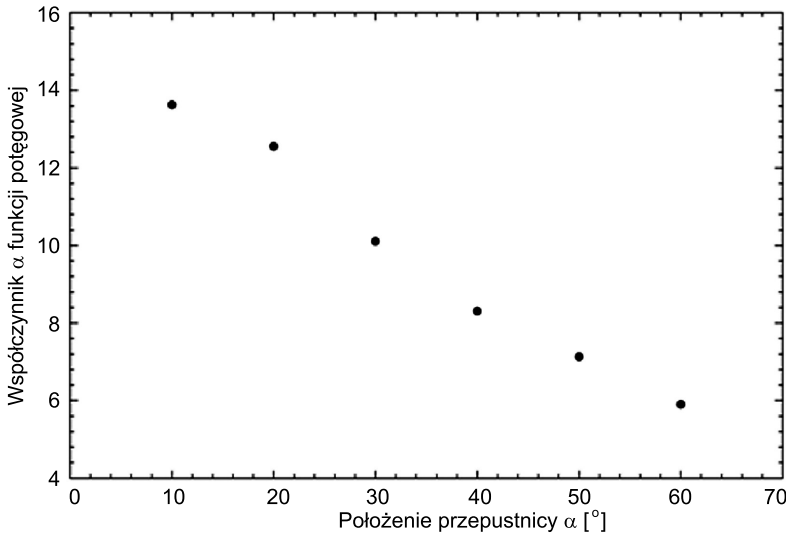
Posługując się programem Excel, wyznaczono krzywe przybliżające rozkład punktów uzyskanych z obliczeń numerycznych, a ich równania ujęto w legendzie rys. 2, w której obok wzorów analitycznych krzywych zaznaczono ilościową informację o jakości ich dopasowania określoną za pomocą współczynnika determinacji R^2 według wzoru:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{v}_i - \bar{v}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2} \quad (4)$$

gdzie:

- n – ilość punktów pochodzących z symulacji numerycznych,
- \hat{v}_i – wartość wyliczona z równania analitycznego przybliżającego rozkład punktów uzyskanych z obliczeń numerycznych,
- v_i – wynik symulacji,
- \bar{v}_i – średnia arytmetyczna prędkości pochodzących z symulacji.

Jak widać na rys. 2 dla wszystkich kątów α współczynnik determinacji R^2 jest równy jeden, co oznacza, że równanie potęgowe w stu procentach wyjaśnia kształtowanie się zmiennej objaśnianej, jaką w tym przypadku jest prędkość powietrza, w zależności od zmiennej objaśniającej, czyli momentu siły w osi przepustnicy. Wobec powyższego, równanie postaci $v = a\alpha^b$ może służyć jako model opisujący zależność prędkości powietrza v od momentu obrotowego τ powstającego w osi przepustnicy dla danego kąta α . Na rys. 3 i 4 przedstawiono zależności współczynników $a(\alpha)$ i $b(\alpha)$.

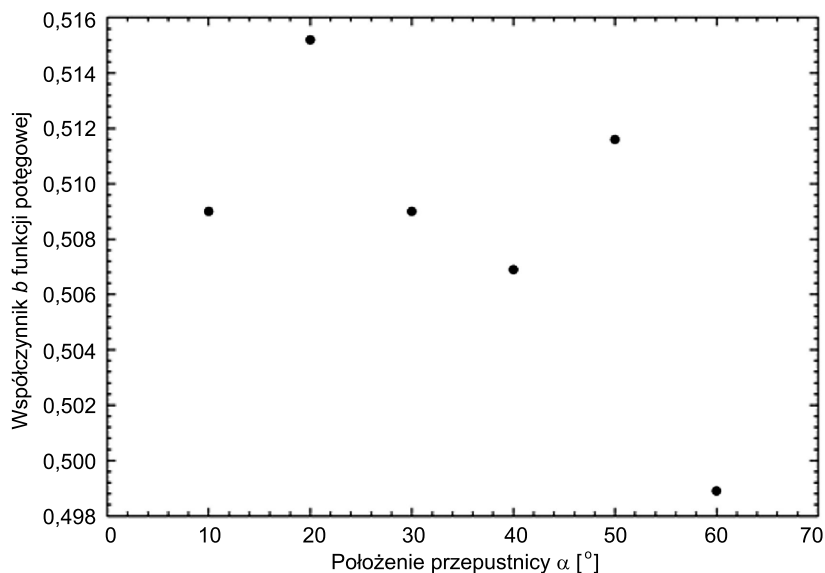


Rys. 3. Współczynnik a funkcji potęgowej $v(\tau) = a\tau^b$ dla różnych kątów α płaskiej przepustnicy jednopłaszczyznowej

Fig. 3. Coefficient a in relationship $v(\tau) = a\tau^b$ for different α value of butterfly valve

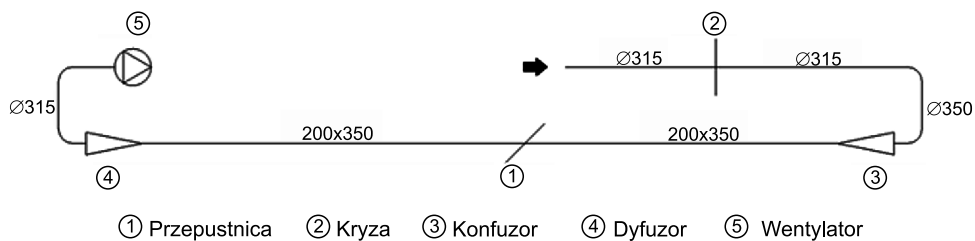
Wartości momentu obrotowego, na podstawie których wyznaczono zależność potęgową $v(\tau) = a\tau^b$, pochodziły z obliczeń numerycznych modelu opisanego w części I. Model ten

został wstępnie zweryfikowany, a do celów walidacji przeprowadzono porównanie z wynikami pomiarów rzeczywistego zjawiska fizycznego. Ostateczna walidacja wyników obliczeń numerycznych została przeprowadzona na stanowisku badawczym w laboratorium Instytutu Inżynierii Ciepłej i Ochrony Powietrza Politechniki Krakowskiej.



Rys. 4. Wykładnik b funkcji potęgowej $v(\tau) = a\tau^b$ dla różnych katów α płaskiej przepustnicy jednopłaszczyznowej

Fig. 4. Exponent b in relationship $v(\tau) = a\tau^b$ for different α value of butterfly valve



Rys. 5. Schemat stanowiska badawczego

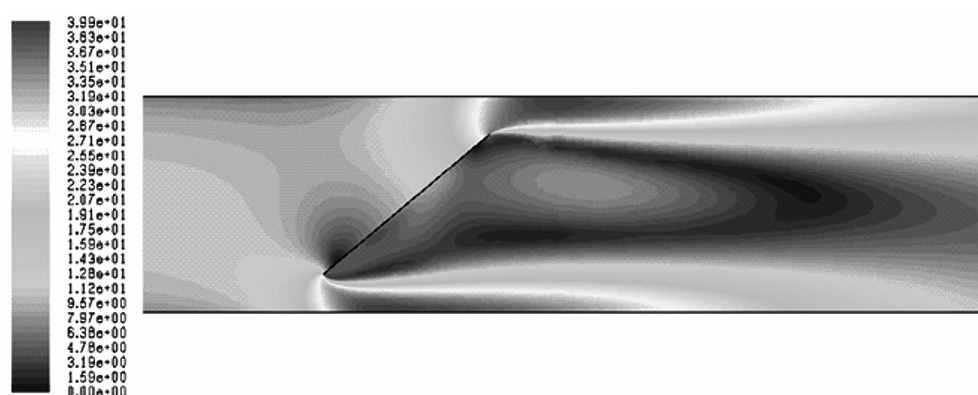
Fig. 5. Test stand scheme

Przed przystąpieniem do budowy stanowiska pomiarowego wykonano obliczenia numeryczne – na modelu wstępnie zweryfikowanym – pozwalające oszacować długości odcinków prostoliniowych instalacji. W pierwszej kolejności zbadano zasięg zakłócenia profilu prędkości, jaki wprowadza płaska przepustnica jednopłaszczyznowa. Znając długości odcinków przed i za przepustnicą, przygotowano schemat stanowiska (rys. 5). Obecność przewodów

okrągłych w instalacji pomiarowej wynika z jednej strony z króćca przyłączeniowego do wentylatora oraz z drugiej, z referencyjnego pomiaru natężenia przepływu, wykonywanego przy pomocy zwężki pomiarowej zgodnie z normą [7, 8]. Długości odcinków prostoliniowych przed (10 m) i za kryzą (3 m) są konsekwencją wymagań określonych w cytowanej normie. Zmiana przekroju kanału z okrągłego na prostokątny zrealizowana została przy pomocy konfuzora o długości 1 metra, a dyfuzor o identycznych wymiarach umożliwił przejście z przekroju prostokątnego na kołowy. Kolejne obliczenia numeryczne pozwoliły określić zasięg zakłóceń wywoływanych przez zaprojektowane w instalacji kształtki. Uwzględniono odpowiednie długości kanałów prostych za układem kolano–konfuzor oraz przed zestawem dyfuzor–kolano.

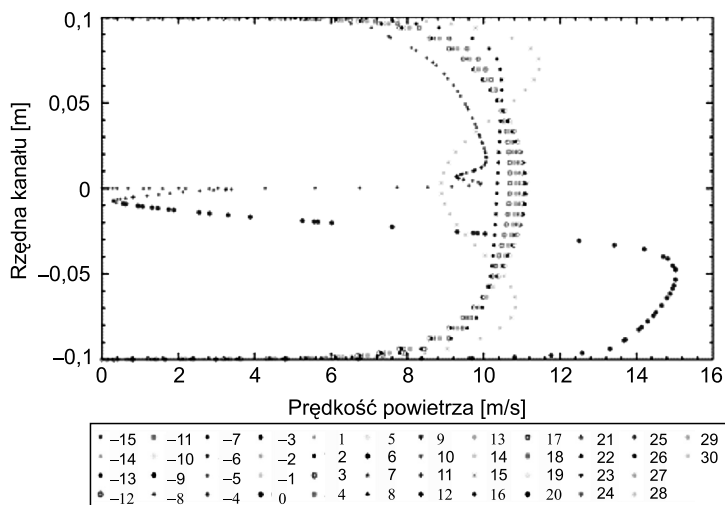
3. Badanie zasięgu zakłócenia profilu prędkości wprowadzanego przez płaską przepustnicę

Rysunek 6 ilustruje zaburzenie pola prędkości w kanale wywołane obecnością płaskiej przepustnicy jednopłaszczyznowej. Ocena zasięgu deformacji profilu prędkości – występującej zarówno za przepustnicą, jak i przed nią (rys. 7) – pozwala zbudować stanowisko badawcze, które eliminuje z pomiarów ewentualne błędy wynikające z omawianego zaburzenia. Analiza zniekształcenia profilu prędkości, wprowadzanego przez przepustnicę, przeprowadzona została dla prędkości maksymalnych we wszystkich badanych położeniach przepustnicy. Do obliczeń zastosowano model opisany w artykule *Przepływ powietrza w kanale z płaską przepustnicą jednopłaszczyznową. Część I: Model numeryczny 2D* (s. 91-107). Za kryterium oceny stabilizacji przepływu przyjęto ustalenie się stosunku prędkości średniej do prędkości maksymalnej w danym przekroju kanału. Na podstawie wyników obliczeń zilustrowanych na rys. 8, przedstawiającym zmianę v_{sr}/v_{max} poszczególnych położeniach przepustnicy na całej długości badanego kanału – wnioskowano o długości odcinków prostych. Przyjęto 3-metrowy odcinek prosty przed przepustnicą oraz 9-metrowy za przepustnicą.



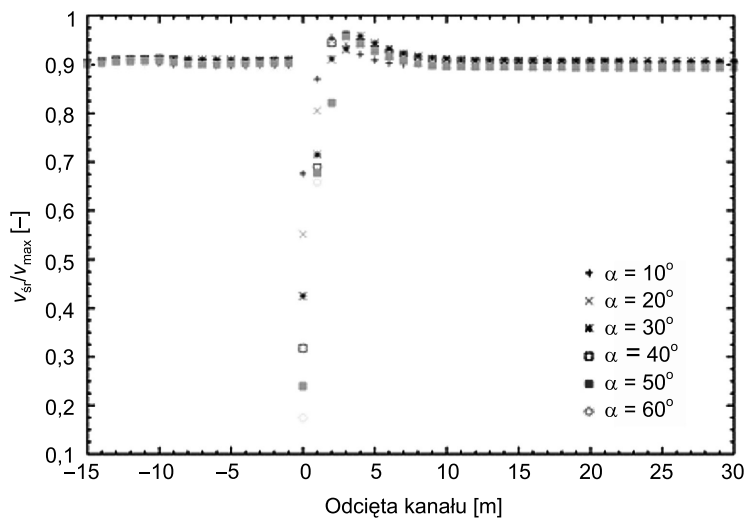
Rys. 6. Pole prędkości w sąsiedztwie płaskiej przepustnicy dla $\alpha = 40^\circ$ i $v = 10$ m/s

Fig. 6. Velocity field in the neighborhood of butterfly valve for $\alpha = 40^\circ$ and $v = 10$ m/s



Rys. 7. Profile prędkości w badanym kanale w przekrojach co 1 metr dla $\alpha = 10^\circ$ i $v = 10$ m/s (liczby podane w legendzie oznaczają odciętą kanału przepustnicy podaną w metrach)

Fig. 7. Velocity profile in the duct in cross-section every 1 meter for $\alpha = 10^\circ$ and $v = 10$ m/s (the numbers in the legend are duct's abscissae in meters)

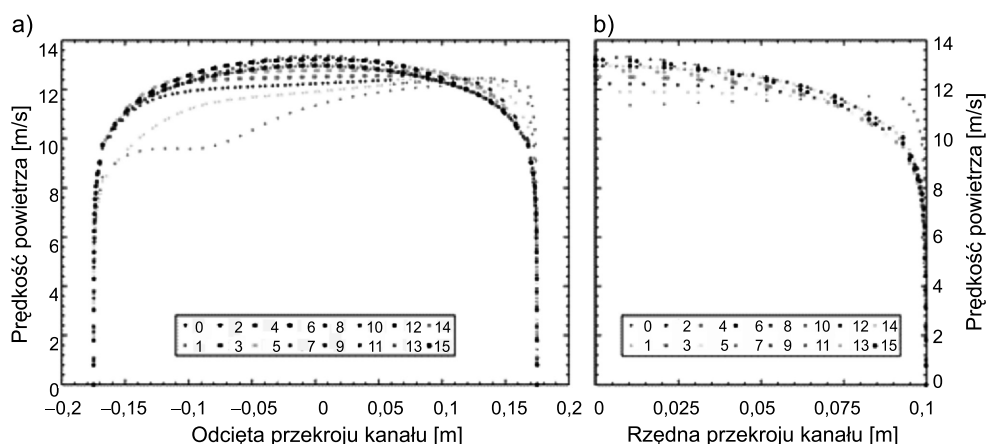


Rys. 8. Zmiana stosunku v_{sr}/v_{\max} na długości kanału dla poszczególnych położenia przepustnicy

Fig. 8. Variation of v_{sr}/v_{\max} ratio along the duct for different damper position α

4. Analiza deformacji profilu prędkości wynikająca z zaprojektowanych w układzie pomiarowym kształtek

Geometria badanych układów: kolano–konfuzor oraz dyfuzor–kolano wymagała przeprowadzenia symulacji 3D, z możliwością modelowania tylko połowy układu z uwagi na jego symetrię względem płaszczyzny poziomej. Ze względu na identyczne wymiary konfuzora i dyfuzora do wyznaczenia zasięgu deformacji profilu prędkości wykorzystano jedną siatkę w dwóch konfiguracjach obliczeniowych: dla konfuzora wlot zlokalizowano na kanale okrągłym, a dla dyfuzora na kanale prostokątnym. Do obliczeń zastosowano model opisany w artykule *Przepływ powietrza w kanale z płaską przepustnicą jednopłaszczyznową. Część I: Model numeryczny 2D* (s. 91-107). Warunki brzegowe na wlocie dla układu z konfuzorem pochodziły z obliczeń dla ćwiartki 30-metrowego kanału okrągłego o średnicy 315 mm, przeprowadzonych dla warunku stałego ciśnienia wlotowego rzędu 190 Pa, co odpowiada prędkości w kanale nieco przekraczającej 12 m/s. Analogicznie warunki na wlocie dla układu z dyfuzorem zaczerpnięto z symulacji numerycznych przepływu powietrza w ćwiartce kanału prostokątnego o wymiarach 200×350 mm. Wartości zadawane na wlocie do badanych układów pochodziły z połowy długości kanałów prostych.



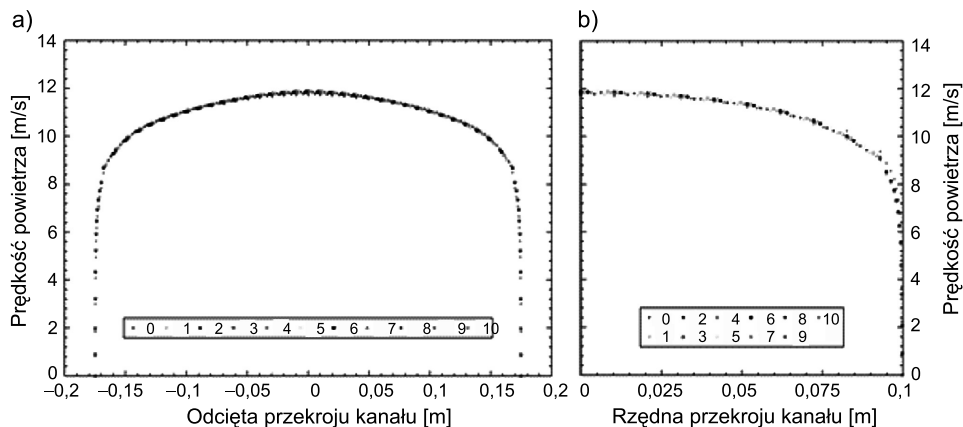
Rys. 9. Profil prędkości powietrza za konfuzorem: wzdłuż osi poziomej przekroju kanału (a), wzdłuż osi pionowej przekroju kanału (b) (liczby podane w legendzie oznaczają odległość za konfuzorem w metrach)

Fig. 9. Velocity profile after convergent pipe: along horizontal axis of duct's section (a), along vertical axis of duct's section (b) (the numbers in the legend are distances from convergent pipe in meters)

Ocena zasięgu zakłóceń była taka, jak opisana wyżej. Analizowano przekroje za konfuzorem oraz przed dyfuzorem w odległości co 1 metr, biorąc pod uwagę profile prędkości w osi pionowej oraz poziomej przekroju kanału.

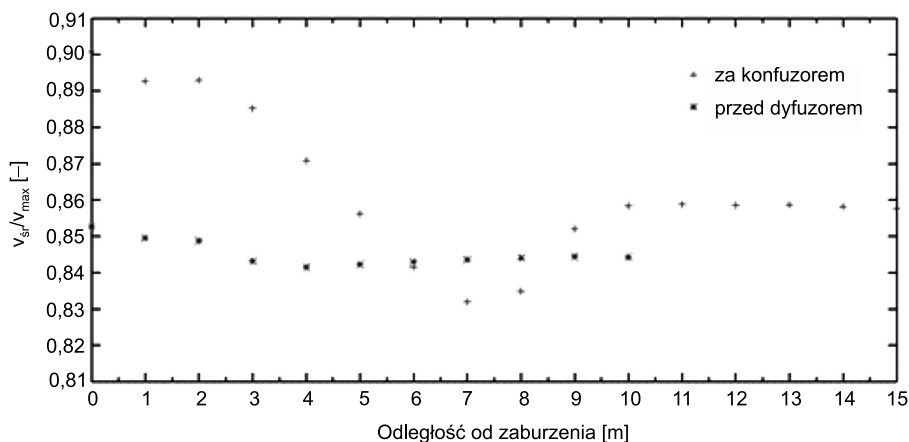
Zaburzenie wsteczne pochodzące od dyfuzora (rys. 10) w porównaniu z tym występującym za konfuzorem (rys. 9) było dużo mniejsze – na rysunku rys. 10(b) widać niewielką deformację profilu prędkości przy ścianie kanału. Długości odcinków prostych przed i za

kształtkami określono na podstawie danych z rys. 11. Uznano, że zaburzenie przed dyfuzorem sięga 3 metrów, natomiast za konfuzorem 10 metrów.



Rys. 10. Profil prędkości powietrza przed dyfuzorem: wzdłuż osi poziomej przekroju kanału (a), wzdłuż osi pionowej przekroju kanału (b) (liczby podane w legendzie oznaczają odległość przed dyfuzorem w metrach)

Fig. 10. Velocity profile before diffuser: along horizontal axis of duct's section (a), along vertical axis of duct's section (b) (the numbers in the legend are distances from diffuser in meters)



Rys. 11. Zmiana stosunku v_{sr}/v_{max} za konfuzorem i przed dyfuzorem

Fig. 11. Variation of v_{sr}/v_{max} ratio before diffuser and after convergent pipe

5. Opis stanowiska badawczego

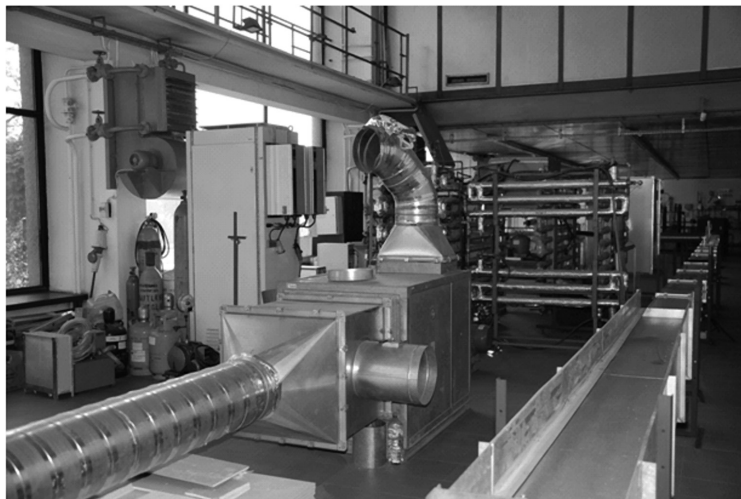
Stanowisko badawcze, którego schemat zamieszczono na rys. 5 składało się z wentylatora wymuszającego przepływ powietrza, 23 metrów kanału okrągłego o średnicy $\varnothing 315$ mm,

25 metrów kanału prostokątnego o wymiarach 200×350 mm, dyfuzora o długości 1 metr do przejścia z kanału prostokątnego na okrągły, konfuzora o długości 1 metr do przejścia z kanału okrągłego na prostokątny, znormalizowanej kryzy pomiarowej o przewężeniu $\beta = 0,7$, skrzynki o wymiarach 200×350 mm o długości 0,8 m, w której montowano badaną przepustnicę, przepustnicy o wymiarach $198 \times 347 \times 2$ mm zamontowanej na łożyskach kulowych.



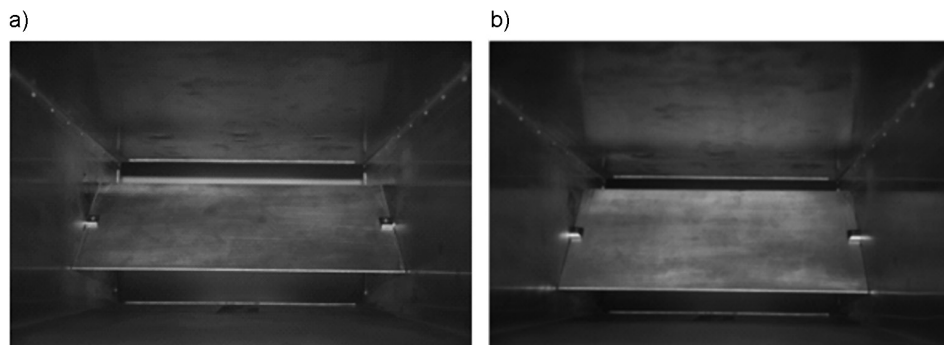
Rys. 12. Stanowisko pomiarowe – fragment z kryzą oraz konfuzorem

Fig. 12. Test stand – fragment with measuring orifice plate and convergent pipe



Rys. 13. Stanowisko pomiarowe – fragment z wentylatorem

Fig. 13. Test stand – fragment with fan

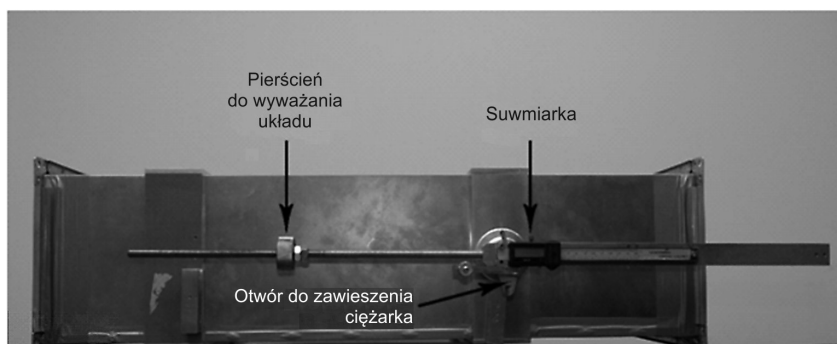


Rys. 14. Płaska przepustnica jednopłaszczyznowa w skrzynce: powierzchnia górna (a), powierzchnia spodnia (b)

Fig. 14. The plane damper in a box: top surface (a), bottom surface (b)

6. Przebieg eksperymentu

Eksperyment polegał na pomiarze momentu obrotowego powstającego w osi przepustnicy. Opracowaną metodę pomiaru oparto na definicji momentu siły, a więc mierzono siłę oraz ramię siły. W celu ułatwienia pomiaru stała była masa ciężarka, a zmianie ulegało ramię. Posłużono się do tego celu specjalnie skonstruowanym ramieniem pomiarowym (rys. 15), które montowane było na pręcie o przekroju kwadratowym, stanowiącym przedłużenie osi przepustnicy. Na części o przekroju prostokątnym ramienia pomiarowego zamontowano suwmiarkę elektroniczną w taki sposób, aby zero suwmiarki pokrywało się ze środkiem obrotu przepustnicy. Druga część ramienia wykonana została z pręta gwintowanego, na którym umieszczono nagwintowany pierścień do wyważania układu wraz z dwiema nakrętkami kontruującymi. Na suwmiarce zastosowano przeciwwagę do równoważenia masy jej ruchomej części. W środku ciężkości tego podukładu, służącego do pomiaru długości ramienia, wywiercono otwór, na którym zawieszano ciężarek.



Rys. 15. Układ pomiarowy

Fig. 15. Measuring system

Część nasadczą ramienia pomiarowego skonstruowana była w sposób pozwalający na ustawianie kątów w badanym zakresie, tzn. nie mierzono kąta położenia przepustnicy, ale dzięki pierścieniowi z przygotowanym pod pręt kwadratowy pozycjonowaniem nasadzano ramię w położeniu poziomym na ustawioną pod odpowiednim kątem oś przepustnicy. Przy pomocy falownika wentylatora ustawiano przepływ w badanym zakresie i kontrolowano go przy użyciu kryzy pomiarowej.

Wykonano pomiar ośmiu wartości momentu obrotowego. Dla każdego z punktów przeprowadzono serie pomiarowe składające się z 8 pomiarów.

7. Dyskusja otrzymanych wyników

W każdym przypadku wartości otrzymane z symulacji były większe od wartości pomierzonych. Jest to spowodowane tym, że w obliczeniach numerycznych nie uwzględniono oporu łożysk, a także faktem, że przepustnica na stanowisku pomiarowym miała wysokość L o 2 mm mniejszą, niż ta w modelu numerycznym. Ponadto wartości pochodzące z obliczeń numerycznych, wykonane dla przypadku 2D, nie uwzględniają oddziaływania ścianek bocznych kanału.

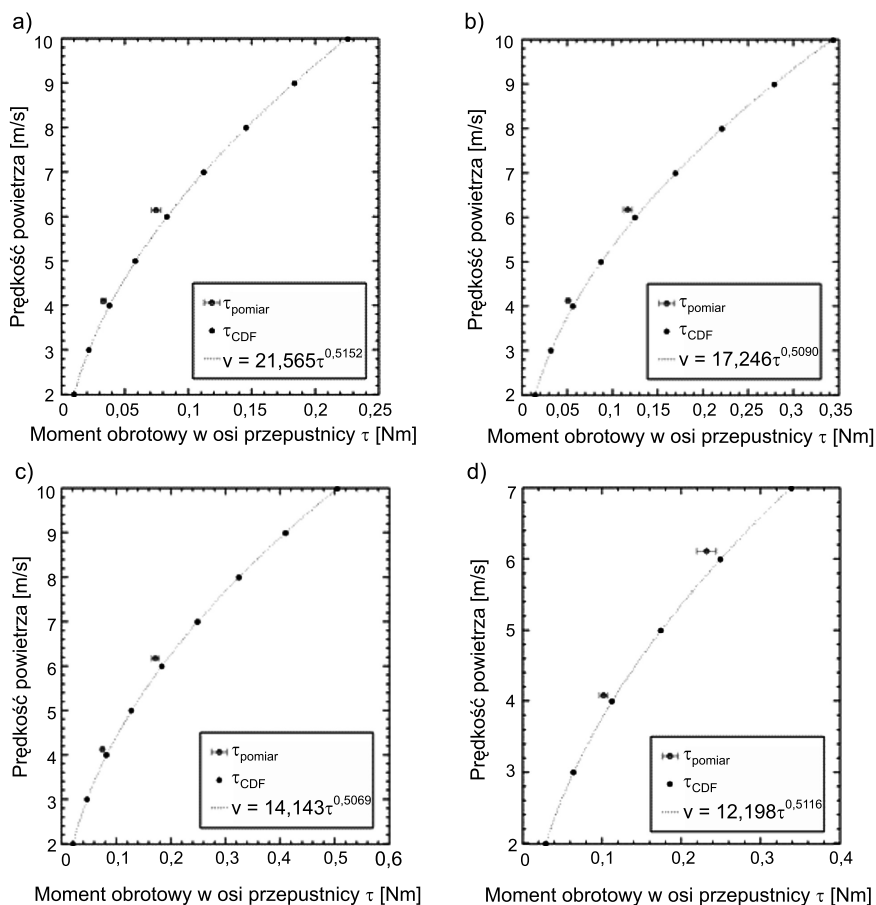
Tabela 1

Wyniki pomiarów τ_p oraz obliczeń τ_{CFD} momentu obrotowego w osi przepustnicy płaskiej, ich różnice procentowe $\delta\tau$ oraz całkowite niepewności względne wyników pomiarów $\delta\tau_p$

α [°]	v [m/s]	τ_{CFD} [Nm]	τ_p [Nm]	$\delta\tau$ [%]	$\delta\tau_p$ [%]
20	4,10	0,0397834	0,0331575	-19,98	5,23
	6,14	0,0874186	0,0745273	-17,30	5,11
30	4,12	0,0590674	0,0509315	-15,97	4,07
	6,17	0,1310248	0,1168610	-12,12	4,22
40	4,12	0,0872493	0,0750285	-16,29	4,13
	6,17	0,1942070	0,1716866	-13,12	4,02
50	4,08	0,1241233	0,1021715	-21,49	5,10
	6,11	0,2755903	0,2318714	-18,85	5,29

Nie bez znaczenia jest również założenie o zerowej grubości przepustnicy w modelu numerycznym. Przepustnica skonstruowana do badań była przepustnica ostrokrawędziową o grubości 2 mm, co w świetle badań [3–5] wydawało się optymalną propozycją.

Całkowite niepewności względne wyników pomiarów $\delta\tau_p$ są większe dla skrajnych kątów otwarcia przepustnicy. Tłumaczyć to można tym, że dla małych kątów α opór łożysk stanowi większe zakłócenie słabego sygnału oraz tym, że dla dużych kątów α utrzymanie ramienia pomiarowego w pozycji poziomej było bardziej wymagające ze względu na powstające turbulencje. Obydwa wymienione zjawiska wpłynęły na zwiększenie niepewności pomiaru poprzez wzrost niepewności przypadkowej wynikający z większego rozrzutu mierzonego ramienia siły.



Rys. 16. Graficzna ilustracja wyników pomiarów dla $\alpha = 20^\circ$ (a), $\alpha = 30^\circ$ (b), $\alpha = 40^\circ$ (c), $\alpha = 50^\circ$ (d)

Fig. 16. Graphic illustration of measurement results for $\alpha = 20^\circ$ (a), $\alpha = 30^\circ$ (b), $\alpha = 40^\circ$ (c), $\alpha = 50^\circ$ (d)

Duża różnica procentowa $\delta\tau$ pomiędzy wynikami pomiarów a wynikami obliczeń w przypadku małych kątów α jest spowodowana wspomnianym już wcześniej faktem większego wpływu oporu łożysk jako zakłócenia słabego sygnału.

Ostatecznie uznano, że wyniki pomiarów mogą stanowić o pozytywnej walidacji modelu numerycznego.

8. Wnioski

Wstępne badania płaskiej przepustnicy pokazały, że istnieje jednoznaczna zależność pomiędzy kątem położenia przepustnicy, momentem obrotowym powstającym w osi przepustnicy oraz prędkością przepływu powietrza w kanale.

Pierwsze symulacje numeryczne przeprowadzone dla płaskiej przepustnicy wykazały, że moment obrotowy powstający w osi może być zbyt słaby – w stosunku do oporu łożysk – dla małych kątów otwarcia przepustnicy i małych prędkości przepływu powietrza. Obserwacje te są zgodne z podobnymi badaniami zrealizowanymi w 2001 roku w Stanach Zjednoczonych [6]. Analiza zmiennych wpływających na wartość siły aerodynamicznej pokazuje, że dla konkretnego płynu o określonej gęstości i lepkości pozostają dwie zmienne nie ujęte w poszukiwanej zależności $v = f(\tau, \alpha)$, tj. lokalizacja osi obrotu przepustnicy oraz kształt powierzchni przepustnicy, i to one mogą posłużyć do zwiększenia wartości momentu obrotowego powstającego w osi przepustnicy.

Przesunięcie osi obrotu jest rozwiązaniem prostszym do zbadania, jednak nie daje się zastosować w przypadku przepustnic okrągłych. Co więcej, po wykonaniu serii badań okazało się, że przesunięcie osi przepustnicy o 3 centymetry powoduje dwukrotne wzmocnienie sygnału w obszarze małych kątów α , ale aż 6-krotne dla kątów α bliskich całkowitemu zamknięciu, które tego nie wymagają [2]. Skutkuje to niekorzystnym poszerzeniem zakresu pomiarowego. Z uwagi na to oraz na wspomniany brak aplikacyjności dla przewodów okrągłych, dalsze prace zostały ukierunkowane na poszukiwanie takiego kształtu przepustnicy, który pozwoliłby na równomierne wzmocnienie momentu obrotowego dla całego zakresu kątów α oraz prędkości v przy równoczesnej minimalizacji oporów przepływu.

L i t e r a t u r a

- [1] Fluent User's Guide [on line], www.fluentusers.com/fluent63/doc/ori/html/rn/rel_index.htm
- [2] K o s o w s k a P., *Pomiar i regulacja natężenia przepływu powietrza w instalacjach wentylacyjnych i klimatyzacyjnych za pomocą przepustnicy o zmodyfikowanym kształcie*, Rozprawa doktorska, Kraków 2009.
- [3] Wojtkowiak J., Oleskiewicz-Popiel C., *Wpływ grubości tarczy przepustnicy jednopłaszczyznowej na jej charakterystykę przepływową (cz. I)*, Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja, Nr 9/2003, 27-28.
- [4] Wojtkowiak J., Oleskiewicz-Popiel C., *Wpływ grubości tarczy przepustnicy jednopłaszczyznowej na jej charakterystykę przepływową (cz. II)*, Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja, Nr 10/2003, 24-26.
- [5] Wojtkowiak J., Oleskiewicz-Popiel C., *Wpływ promienia zaokrąglenia krawędzi tarczy przepustnicy jednopłaszczyznowej na jej charakterystykę przepływową*, Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja, Nr 3/2004, 3-5.
- [6] *Ventilation Measurement and Control. Feasibility Analysis*, California Energy Commission, 2001 (P500-01-029F).
- [7] PN-EN ISO 5167-1:2005 Pomiary strumienia płynu za pomocą zwężek pomiarowych wbudowanych w całkowicie wypełnione rurociągi o przekroju kołowym. Część 1: Zasady i wymagania ogólne.
- [8] PN-EN ISO 5167-2:2005 Pomiary strumienia płynu za pomocą zwężek pomiarowych wbudowanych w całkowicie wypełnione rurociągi o przekroju kołowym. Część 2: Kryzy.