

Badania przepływów w wentylatorze z wirnikiem promieniowym o zabudowie osiowej

TOMASZ SIWEK

Wentylatory są maszynami płynowymi transportującymi gazy, a przede wszystkim powietrze wentylacyjne lub technologiczne, nad którym wykonują pracę potrzebną do przemieszczania, czyli pokonywania oporów przepływu w instalacjach. Na podstawie danych o konsumpcji energii, szacuje się, że wentylatory zużywają około 19% energii elektrycznej z ogółu zużywanej przez grupę maszyn napędzanych silnikami elektrycznymi, co stanowi około 6% całego światowego zużycia energii we wszystkich gałęziach gospodarki. Wentylatory są zatem powszechnie stosowanymi przetwornicami energii, dlatego jest istotne aby były one wysokosprawne. Tradycyjnie używa się wentylatorów promieniowych i osiowych, których konstrukcja jest dobrze zoptymalizowana pod względem energetycznym. Lepsze ciśnienia dają wentylatory promieniowe, przy stosunkowo wysokiej sprawności, wadą ich jest nieosiowa konstrukcja i znaczne gabaryty, utrudniające prosty montaż w instalacji. Dlatego konstrukcje te zastępowane są przez wentylatory promieniowe z zabudowami osiowymi, te z kolei są słabo rozpoznane i mają niską sprawność (często poniżej 40%).

W niniejszej pracy doktorskiej podjęto szereg badań mający na celu rozpoznanie, opisanie i zoptymalizowanie przepływu przez zabudowy osiowe dla wirników promieniowych. Badania te podzielono na trzy grupy wzajemnie się uzupełniające, tj.:

1. badania bilansowe na stanowisku przepływowym zbudowanym w oparciu o normę PN-EN ISO 5801,
2. badania jakościowe przepływu sondą termooanemometryczną,
3. badania numeryczne w oparciu o techniki CFD.

W wyniku przeprowadzonych badań bilansowych uzyskano 54 komplety charakterystyk przepływowych wentylatorów promieniowych w różnych konfiguracjach pracy (36 – układów z zabudowami osiowymi, 9 – z wolnym wylotem, 9 – z zabudową konwencjonalną/spiralną). Na podstawie uzyskanych danych określono wpływ zmiany konfiguracji pracy na sprawność całkowitą układu. Dokonano matematycznego ujęcia zależności sprawności wentylatorów w prostych zabudowach kanałowych (bez prostownic strugi) od ich charakterystycznych wymiarów. Dla zbudowania odpowiedniej zależności pomiędzy parametrami geometrycznymi a sprawnością, opracowano nową liczbę kryterialną, nazwaną wskaźnikiem zabudowy osiowej. Dalsza analiza w zakresie badań bilansowych przedstawiona w pracy, dotyczy ustalenia związków pomiędzy rzeczywistą pracą wirnikową, a pracą teoretyczną Eulera. Analizę tą przeprowadzono w oparciu o teorię niedoboru mocy.

W skutek prowadzonych badań jakościowych, uzyskano na drodze eksperymentu obrazy struktur przepływu przez wentylator promieniowych w różnych typach zabudów, a w szczególności w zabudowie kanałowej. Jako główne narzędzie sondowania przepływu

posłużył termooanemometr trójwłóknowy, umożliwiający pomiar prędkości bezwzględnej przepływającego powietrza, jej składowych w przestrzennym układzie współrzędnych oraz ich turbulencji. Oprócz przestrzennej wizualizacji przepływu, w pracy przedstawione zostały zagadnienia dotyczące badania rzeczywistego poślizgu w kanale międzyłopatkowym oraz związków sprawności maszyny z fluktuacją prędkości na wylocie z wirnika. Na podstawie danych termooanemometrycznych opracowano modele matematyczne: rozkładu poślizgu względem szerokości wirnika oraz równanie przestrzennego toru cząstek za wirnikiem pracującym w zabudowie osiowej.

W części pracy poświęconym badaniom numerycznym, zaprezentowano budowę i walidację modelu przepływowego wentylatora opartego o rozwiązanie wykorzystujące metodę uśredniania Reynoldsa równań Naviera-Stokesa (Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS), uzupełnionych hybrydowym modelem turbulencji SST $k-\omega$. W wyniku prowadzonych symulacji komputerowych na opracowanym modelu CFD, dokonano szczegółowej analizy przepływu w kanałach międzyłopatkowych. Porównano strefy występowania oderwań i wirów oraz rozkłady ciśnień statycznych, w dwóch układach pracy wirnika tj. zabudowie osiowej i spiralnej. Z przeprowadzonego porównania wynika, że zabudowa osiowa gwarantuje symetrię przepływu, a tym samym równowaga sił działających na wirnik utrzymuje się w znacznie większym zakresie charakterystyki, co korzystnie wpływa na parametry eksploatacyjne maszyny.

Istotnym osiągnięciem, prezentowanym w pracy, jest wyznaczenie w oparciu o badania symulacyjne CFD sprawności wolumetrycznej wentylatora. Precyzyjne określenie tego parametru konwencjonalnymi metodami pomiarowymi jest praktycznie niemożliwe.

Wyeliminowanie niekorzystnych zjawisk z przepływu, podczas zmiany kierunku z promieniowego na osiowy jest możliwe tylko dzięki zastosowaniu odpowiednio ukształtowanego dyfuzora łopatkowego, którego wytyczne konstrukcyjne podano w niniejszej pracy. Brak układu prostowania strugi w postaci kierownic łopatkowych, prowadzi do powstawania korka wirowego (ang. cork-screw) na skutek wzrostu składowej obwodowej prędkości w obszarze za wirnikiem.

Dzięki prowadzonym badaniom zrealizowano założone cele pracy i udowodniono postawioną tezę:

„Możliwe jest zastąpienie obudowy spiralnej wysokosprawnego wentylatora promieniowego osiową obudową wirnika bez istotnej zmiany parametrów i wskaźników pracy maszyny, w szczególności bez spadku sprawności energetycznej, przy jednoczesnej poprawie walorów użytkowych, takich jak: gabaryty maszyny, liniowy montaż lub możliwość prostej budowy układów wielostopniowych.”

Opracowana konstrukcja wentylatora promieniowego w zabudowie osiowej osiągnęła sprawność powyżej 80%. Zaproponowane rozwiązanie umożliwia liniowy montaż w przewodach instalacyjnych i łatwą budowę układów wielostopniowych. Wymiar promieniowy konstrukcji został zredukowany o około 50%, tj. z wartości 0,97 m dla zabudowy spiralnej, do 0,45 m dla zabudowy osiowej.

Kluczowe słowa: kanałowy wentylator promieniowy, CFD, termooanemometr, dyfuzor łopatkowy, współczynnik poślizgu

05.07.2017r. Tomasz Siwek

Investigation of flows in in-line centrifugal fan

TOMASZ SIWEK

Fans are fluid machines transporting gas and primarily ventilation or process air on which they perform work necessary for the displacement, i.e. for overcoming the flow resistance in installations. Based on data relating to energy consumption, it is estimated that fans use approximately 19% of electrical energy out of the total used by the group of machines propelled by electric motors, which makes up approx. 6% of the total energy consumption in all sectors of economy worldwide. Fans are thus commonly used energy converters, and therefore it is essential that they should be highly efficient. Traditionally, centrifugal and axial fans are used, the design of which is well optimised in terms of energy efficiency. Better pressures are provided by radial fans, at relatively high efficiency; their disadvantage, however, is the non-axial design and bulky dimensions, which precludes simple and easy installation. For this reason, these designs are being replaced by in-line centrifugal fans; however, these are poorly identified and have low efficiency (commonly below 40%).

This doctoral dissertation takes up a number of studies aimed at recognising, describing and optimising the flow through in-line enclosures for centrifugal impellers. The studies were divided into three complementary groups, i.e.,

1. balance studies at a flow testing station constructed based on PN-EN ISO 5801;
2. qualitative flow testing with an anemometer probe;
3. numerical studies based on CFD techniques.

As a result of the balance studies, 54 sets of performance curves were obtained for centrifugal fans in various operation configurations (36 – in-line enclosure arrangements, 9 – with free outlet, 9 – with conventional/spiral enclosure). Based on the data obtained, the impact of changes in the operation configurations on the overall efficiency of the system was determined. A mathematical formula was developed for the correlation between fan efficiency in simple duct enclosures (without stream straighteners) and their characteristic dimensions. In order to construct an appropriate correlation between the geometrical parameters and the efficiency, a new criterion number was developed, called in-line enclosure index. Further analysis in the scope of balance studies presented in the paper concerns the determination of relations between the actual impeller operation and Euler's theoretical work. This analysis was conducted based on the slip factor theory.

As a result of the qualitative studies, images of structures of flows through centrifugal fans in different enclosures, and in particular in the duct enclosure, were obtained on experimental basis. The main flow-probing tool used was a triple wire thermo-anemometer that enables taking measurements of absolute velocity of air flow, its constituents in the spatial coordinate system and its turbulence. Apart from the spatial visualisation of the flow, the paper presents issues concerning investigation of the actual slip in the blade passage and relations between the efficiency of the machine and the velocity fluctuation in the impeller

outflow region. Based on the thermo-anemometric data mathematical models were developed concerning the slip distribution with respect to the impeller width as well as an equation of the spatial trajectories of particles behind an impeller operating in an in-line enclosure.

The part of the paper that is devoted to numerical studies presents the construction and validation of a fan flow model based on a solution that takes advantage of the Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) method supplemented with the hybrid SST $k-\omega$ turbulence model. As a result of computer simulations on the CFD model developed, a detailed analysis of flow in blade passages was performed. Zones of the occurrence of exits and whirls were compared as well as the distributions of static pressures in two operating schemes of the impeller, i.e. in in-line and spiral enclosures. From the comparison made, it follows that the in-line enclosure ensures the symmetry of flow, and thereby, the equilibrium of forces acting on the impeller remains in a significantly higher scope of characteristics, which has an advantageous effect on the operating parameters of the machine.

An essential achievement presented in the paper is the determination of the volumetric efficiency of the fan based on CFD simulation studies. A precise determination of this parameter using the conventional measuring methods is virtually impossible.

Elimination of the adverse phenomena from the flow at the change in direction, from centrifugal to axial is only possible through the application of an appropriately shaped vane diffuser, the design guidelines of which have been provided in this paper. The lack of a stream straightening system in the form of guide vanes leads to the formation of a cork-screw due to the increase in the peripheral component of velocity in the region behind the impeller.

Thanks to the studies carried out, the assumed objectives of the dissertation have been achieved and the thesis advanced has been proven.

“It is possible to substitute a spiral enclosure of a high-efficiency centrifugal fan with in-line impeller enclosure without an essential change in parameters and indicators of the operation of the machine, in particular without a drop in energy efficiency, with a simultaneous improvement in utility features, such as: dimensions of the machine, linear assembly or the possibility of simple construction of multistage systems.”

The developed design of an in-line centrifugal fan achieved efficiency above 80%. The proposed solution enables linear assembly in ventilation ducts and easy construction of multi-stage systems. The radial dimension of the structure was reduced by approx. 50%, i.e. from the value of 0.97 m for the spiral enclosure to 0.45 m for the in-line enclosure.

Key words: in-line centrifugal fan, CFD, thermo-anemometer, vane diffuser, slip factor

05.07.2017r. Tomasz Siwek