

BADANIE WENTYLATORÓW PROMIENIOWYCH

Andrzej MROWIEC*, **Marcin HERONIMCZAK**

*Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Kaliszu, Wydział Politechniczny,
ul. Poznańska 201-205, 62-800 Kalisz, a.mrowiec@pwsz.kalisz.pl, marcin.heronimczak@gmail.com*

Streszczenie: W artykule przedstawiono projekt i wykonanie stanowiska pomiarowo-odbiorczego, przeznaczonego do odbioru produkowanych wentylatorów promieniowych (odśrodkowych z łopatkami odgiętymi do tyłu) stosowanych w układach wyciągowych powietrza zanieczyszczonego pyłami różnego pochodzenia. Przedstawiono też wirtualne stanowisko pomiarowe wykonane w oprogramowaniu SolidWorks, na którym, przeprowadzono dla badanego wentylatora promieniowego symulacje numeryczne w module Flow Simulation. Otrzymane z tych symulacji wyniki porównano z wynikami uzyskanymi w badaniach doświadczalnych (odbiorczych) wentylatora promieniowego, które przedstawiono w postaci wykresów charakterystyk przepływowych. Przedstawiono również, wyniki symulacji numerycznych rozkładu ciśnienia i prędkości w kanale przepływowym stanowiska pomiarowego, jak i w badanym wentylatorze.

Słowa kluczowe: wentylator promieniowy, kryza pomiarowa, krzywe spiętrzenia.

1. WSTĘP

Wentylatory należą do grupy maszyn przepływowych, w których w następstwie dynamicznego oddziaływania z nieruchomymi i wirującymi elementami, przepływający czynnik gazowy zwiększa lub zmniejsza swój potencjał energetyczny. W rodzinie maszyn przepływowych zalicza się je do maszyn roboczych wirnikowych. W wentylatorach w wyniku obrotu wirnika następuje zmiana prędkości względnych przepływającego powietrza lub gazu, a powstająca przy tym różnica prędkości obwodowych na wlocie i wylocie z wirnika, powoduje znaczny przyrost ciśnienia wynikającego ze zmian prędkości bezwzględnych przepływającego czynnika gazowego w jego obszarze [1, 2]. W czasie pracy wentylatora powstają przyrosty ciśnienia statycznego o różnej wartości. Przyrosty te przedstawione w funkcji strumienia objętości tworzą charakterystyki, będące wykresami zależności ciśnienia spiętrzenia od strumienia objętości przepływającego

medium (głównie powietrza), nazywane często w literaturze krzywymi dławienia.

W zależności od wielkości wytwarzanego przyrostu ciśnienia statycznego (spiętrzenia statycznego) wentylatory można umownie podzielić na [3]:

- niskoprężne,
- średnioprężne,
- wysokoprężne.

Innym, kryterium podziału wentylatorów jest kierunek przepływu czynnika przez wirnik i z tego względu wentylatory dzieli się na:

- promieniowe (odśrodkowe),
- osiowe oraz
- mieszane

W wentylatorach promieniowych medium gazowe zasysane jest osiowo na wieniec łopatkowy wirnika, a z niego tłoczona jest ono promieniowo. Wentylatory osiowe zaś zasysają i tłoczą czynnik gazowy tylko w kierunku osiowym maszyny przepływowej.

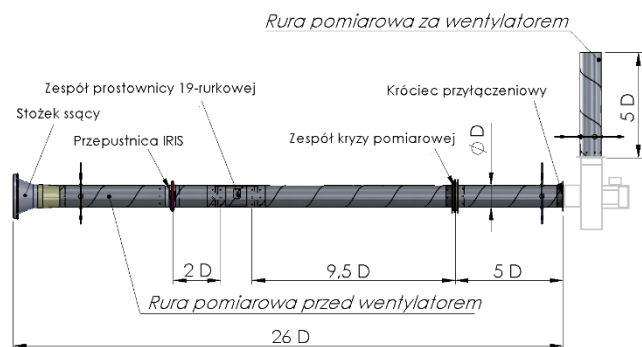
W grupie wentylatorów promieniowych można wyodrębnić trzy rodzaje wentylatorów różniących się budową wirnika. Są to wirniki z łopatkami odgiętymi do przodu (w kierunku obrotu wirnika), z łopatkami prostymi (promieniowymi) lub z łopatkami odgiętymi do tyłu (przeciwnie do kierunku obrotu). Od zaprojektowanej i wykonanej fizycznie konstrukcji wirnika wentylatora promieniowego, zależy kształt krzywej przepływowej charakterystyki tego wentylatora [4].

Jedną z wielu zalet wentylatorów promieniowych z prostymi czy zagiętymi do tyłu łopatkami jest prostota konstrukcji i wykonania, oraz to, że łopatki wirnika wykonuje się głównie z typowej stali konstrukcyjnej, co umożliwia ich szybką naprawę w warunkach przemysłowych. Stosuje się je przeważnie w instalacjach wyciągowych przy odpylaniu głównie gazów przemysłowych lub innych silnie zanieczyszczonych pyłami różnego pochodzenia.

*Autor korespondencyjny, e-mail: a.mrowiec@pwsz.kalisz.pl

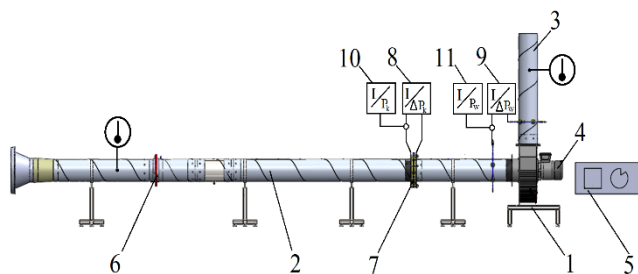
2. STANOWISKO POMIAROWE

Dla produkowanego wentylatora promieniowego, zaprojektowano stanowisko pomiarowo-odbiorcze (rys. 1), zgodnie z obowiązującą normą PN-ISO 5801:2008 („Wentylatory przemysłowe – Badanie charakterystyk pracy na stanowiskach znormalizowanych”), jako układ pomiarowy otwarty umożliwiający swobodny przepływ powietrza przy pracy wentylatora. Zaprojektowane stanowisko badawcze zaliczane jest wg normy do typu C i charakteryzuje się ono funkcją „badany wlot i swobodny wyrzut”. Rurociąg pomiarowy (wlotowy i wylotowy) zaprojektowano i wykonano z rur stalowych zwijanych o średnicy wewnętrznej $D=160$ mm. W rurociągu wlotowym (ssawnym) położenie zespołu przepływomierza zwężkowego, zespołu stabilizatora strugi (tzw. prostownicy) i przepustnicy osiowej dobrano, jako iloczyn współczynnika i średnicy wewnętrznej rurociągu D zgodnie z normą [8].



Rys. 1. Projekt stanowiska pomiarowo-odbiorczego
Fig. 1. A design of measuring and receiving post

W projektowanym stanowisku przyjęto całkowitą długość rurociągu ssawnego równą $26D$, a jego wlot zakończono stożkiem ssawnym. Kryzę spiętrzającą ISA zespołu pomiarowego przepływu powietrza umieszczono w rurociągu w odległości $5D$ przed króćcem wlotowym wentylatora. Przed kryzą od strony ssawnej w odległości $9,5D$ umieszczono 19-rurkową prostownicę strugi o długości $2D$ [5], a przed nią w odległości $2D$ przepustnicę osiową typu IRIS DN 160 do regulacji przepływającego strumienia powietrza. Na rys. 2 przedstawiono schemat zbudowanego stanowiska pomiarowo-odbiorczego wyposażonego w aparaturę kontrolno-pomiarową umożliwiającą pomiar wielkości wchodzących w zakres badań odbiorczych produkowanego wentylatora [7]. Stanowisko pomiarowe (rys. 2) składa się z badanego wentylatora promieniowego (1), oraz układu rurociągów: ssawnego (2) i tłocznego (3) oraz armatury i przyrządów pomiarowych.



Rys. 2. Schemat wykonanego stanowiska pomiarowo-odbiorczego
Fig. 2. A diagram of a measuring and receiving post

Wentylator napędzany jest silnikiem synchronicznym trójfazowym (4) o mocy $0,55$ kW, zabezpieczonym automatycznym bezpiecznikiem nadmiarowo-prądowym. Każde uruchomienie wentylatora i ustawienie odpowiedniej prędkości obrotowej wirnika odbywa się płynnie przy użyciu falownika (5). Do zmiany charakterystyki hydraulicznej przewodu ssawnego w instalacji przepływowej wykorzystano wielostopniową przepustnicę osiową typu IRIS DN 160 (6). Regulowano nią płynnie przepływający strumień objętości. Zmieniając pozycję suwaka na skali zamknięcia przepustnicy od zera do maksimum, zmienia się otwarcie przesłony, a przez to dławi się przepływ powietrza w rurociągu wlotowym do wentylatora.

Do wyznaczenia strumienia objętości przepływającego powietrza, w rurociągu wlotowym zamontowano kryzę pomiarową ISA (7), która wraz z podłączonym do niej elektronicznym manometrem różnicowym (8) tworzy zespół przepływomierza zwężkowego [6]. Wymiary geometryczne kryzy pomiarowej wyznaczono wykorzystując program TNflow 3.10 – „Obliczenia zwężek pomiarowych wg PN-EN ISO 5167:2005”. Pomiar wartości ciśnienia spiętrzenia Δp_k przed i za tarczą kryzy ISA mierzono w szczelinach przytarczowych wykonanych w kołnierzach obudowy kryzy. Pomiaru tego dokonywano za pomocą inteligentnego przetwornika różnicy ciśnień typu APR-2000G z ustawionym zakresem pomiarowym $0...0,96$ kPa. Ten sposób pomiaru cechuje uśrednianie mierzonych ciśnień w przekrojach pomiarowych i dodatkowo niweluje niewielkie błędy osiowości rurociągu mogące powstać przy montażu.

Pomiędzy króćce: ssawny i tłoczny wentylatora podłączono inteligentny przetwornik różnicy ciśnień typu APR-2000G (9) z ustawionym zakresem pomiarowym $0...1,28$ kPa do pomiaru całkowitego spiętrzenia ciśnienia statycznego Δp_w na wentylatorze. Zainstalowane w kanale wlotowym elektroniczne wakuometry (10) i (11) służą do pomiaru wysokości podciśnienia odpowiednio w miejscu pomiaru strumienia wydajności i na wlocie do wentylatora. Uzupełnienie aparatury kontrolno-pomiarowej stanowią dwa termometry elektroniczne, każdy z wyświetlaczem

cyfrowym, do pomiaru temperatury powietrza przed i za wentylatorem. Za pomocą elektronicznych przetworników ciśnienia i różnicy ciśnień równolegle rejestrowano wartości podciśnień w miejscach ich zainstalowania oraz spiętrzenia na kryzie pomiarowej, a także całkowitego spiętrzenia ciśnienia statycznego wentylatora. W czasie pomiarów charakterystyk wentylatora na stanowisku pomiarowym mierzono dodatkowo ciśnienie barometryczne oraz wilgotność powietrza, jako dane niezbędne do wyznaczenia rzeczywistego strumienia objętości q_v .

3. BADANIA DOŚWIADCZALNE

Badania doświadczalne wentylatora promieniowego przeprowadzono na stanowisku pomiarowym (rys. 2), na którym wyznaczono (zgodnie z normą [6]) wartość strumienia objętości q_v [m³/s] wytwarzanego przez badany wentylator.

Strumień objętości przepływającego powietrza q_v w kanale wlotowym badanego wentylatora obliczano wg poniższej zależności (1):

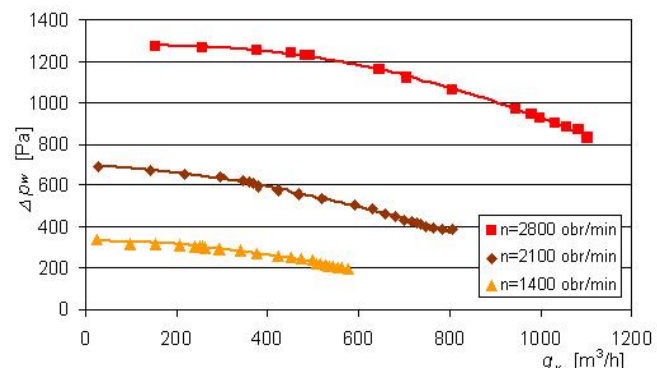
$$q_v = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_k}{\rho}} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (1)$$

gdzie:

- C - współczynnik przepływu – wyznaczono wg PN-EN ISO 5167:2005,
- β - przewężenie kryzy ($\beta = d/D$),
- ε - współczynnik ekspansji – wyznaczono wg PN-EN ISO 5167:2005,
- d - średnica otworu kryzy [m],
- ρ - gęstość przepływającego medium [kg/m³],
- Δp_k - różnica ciśnień przed i za kryzą pomiarową [Pa].

Na podstawie tak wyznaczonego objętościowego strumienia przepływu powietrza przez badany wentylator wyznaczono odpowiadające mu charakterystyki pracy wentylatora. Charakterystykami tymi są krzywe spiętrzenia statycznego $\Delta p_w = f(q_v)$, będące różnicą uśrednionych po przekroju ciśnień statycznych, mierzonych w strefie wylotowej i wlotowej badanego wentylatora dla przyjętej stałej prędkości obrotowej wirnika [8]. Na rys. 3 przedstawiono krzywe spiętrzenia ciśnienia statycznego $\Delta p_w = f(q_v)$ dla trzech wybranych prędkości obrotowych wirnika wentylatora promieniowego, stabilizowanych układem falownika.

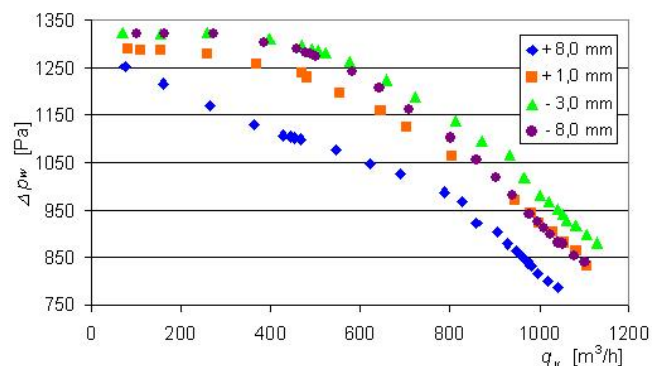
Dodatkowo, wykonano badania pozwalające ocenić wpływ wielkości szczeliny między króćcem ssawnym a tarczą wlotową wirnika (dla badanego wentylatora szczelina wynosiła +1,0 mm). W tym celu badany wentylator zmodyfikowano tak, by można było powiększać lub pomniejszać szczelinę aż do wartości ujemnej, tworząc tym układ zakładki (króciec ssawny wsunięty we wlot wirnika).



Rys. 3. Rozkład krzywych spiętrzenia $\Delta p_w = f(q_v)$, w zależności od prędkości obrotowych wirnika

Fig. 3. The distribution of backwater curves $\Delta p_w = f(q_v)$ depending on turns of a rotor

Na rys. 4 przedstawiono charakterystyki (krzywe spiętrzenia $\Delta p_w = f(q_v)$) pracy wentylatora, które uzyskano w czasie badań wpływu wielkości szczeliny wlotowej do wirnika, przy obrotach silnika $n = 2800 \pm 20$ obr/min.



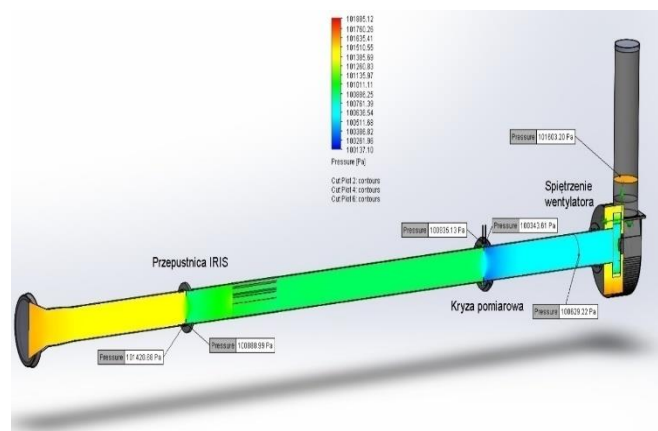
Rys. 4. Wpływ szczeliny wlotowej wirnika na spręż wentylatora
Fig. 4. The impact of an inlet port of a rotor on fan pressure

Przeprowadzone badania wykazały, że najkorzystniejszą charakterystykę spiętrzenia $\Delta p_w = f(q_v)$ wentylatora uzyskano przy niewielkiej zakładce, równej -3 mm (rura ssawna jest wsunięta na 3 mm we wlot wirnika).

4. BADANIA NUMERYCZNE

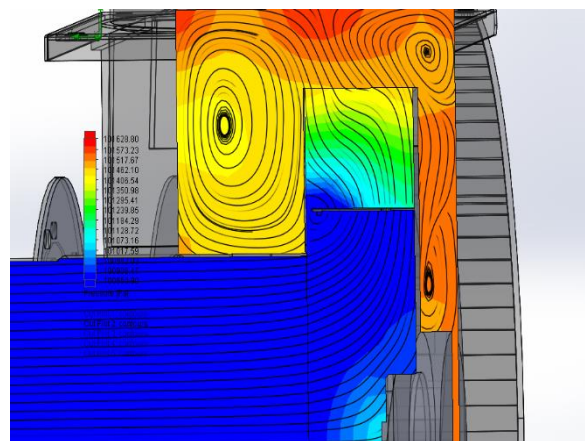
Badania numeryczne przeprowadzono wykorzystując oprogramowanie SolidWorks 2014 Flow Simulation stosowane w procesie projektowania maszyn przepływowych i ich symulacji numerycznych [9]. Do realizacji tego zadania zbudowano wirtualne stanowisko pomiarowe wraz z „badanym” wentylatorem (rys. 5). Modele 3D opracowano na podstawie dokumentacji badanego wentylatora promieniowego oraz pozostałych elementów i podzespołów wykorzystanych do fizycznego wykonania stanowiska badawczo-odbiorczego. W następnej

kolejności przeprowadzono wirtualne numeryczne badanie wentylatora promieniowego przy prędkości obrotowej wirnika wynoszącej $n = 2800$ obr/min. W badaniu tym uwzględniono oprócz parametrów standardowych jak strumień czy ciśnienie, dodatkowe parametry odpowiedzialne za jakość powierzchni rurociągu, temperaturę otoczenia, wilgotność powietrza czy kierunek obrotu wirnika.



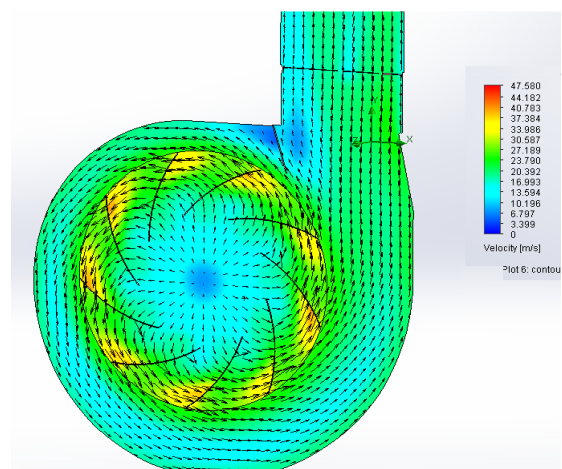
Rys. 5. Wirtualne stanowisko pomiarowe
Fig. 5. A virtual measuring post

Wprawiony w ruch obrotowy wirnik powoduje, że cząsteczki powietrza pod wpływem siły odśrodkowej wyrzucane są na zewnątrz wirnika wytwarzając podciśnienie w kanale ssącym i nadciśnienie w kanale wyrzutowym wentylatora. W programie ruch obrotowy wirnika zastąpiono wirtualnym ruchem obrotowym cylindrycznej objętości o średnicy równej średnicy zewnętrznej wirnika i wysokości równej szerokości wieńca łopatkowego. Wprowadzono również odpowiednie warunki brzegowe na końcach (wlot – wylot) układu pomiarowego (rys. 5), zapobiegające powstawaniu niekontrolowanych samoistnych ruchów powietrza w badanym numerycznie rurociągu. Pomiar sprężu (spiętrzenia ciśnienia statycznego) wentylatora wyznaczono, jako różnicę uśrednionego ciśnienia panującego w przekrojach pomiarowych przed i za wentylatorem. W wirtualnym jak i rzeczywistym stanowisku, przekroje pomiaru sprężu wentylatora wyznaczono w odległości $1D$, tak przed, jak i za wentylatorem. Strumień wydajności wirtualnego wentylatora obliczano wg zależności (1) wykorzystując uzyskane w trakcie badań numerycznych wartości ciśnień statycznych przed i za kryzą pomiarową w miejscach poboru ciśnienia spiętrzenia. Na rys. 6 przedstawiono warstwicowy rozkład ciśnienia statycznego w przekroju wzdłużnym wzdłuż osi wirnika wentylatora, z uwidocznionymi strefami powstawania zawirowań strumienia.



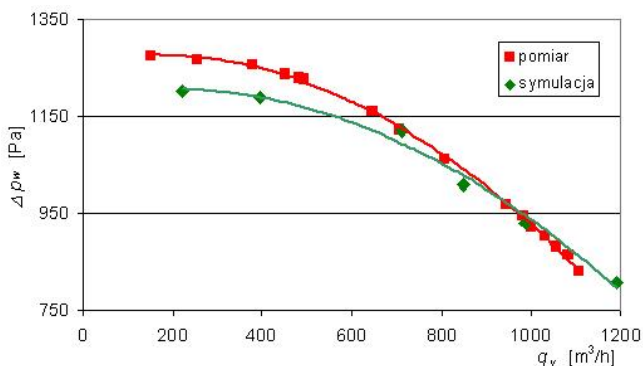
Rys. 6. Warstwicowy rozkład ciśnienia statycznego w przekroju wzdłużnym wentylatora
Fig. 6. The distribution of static pressure in longitudinal section of a fan

Na rys. 7 przedstawiono rozkład wektorów prędkości w komorze spiralnej wentylatora z uwidocznionymi obszarami powstawania zawirowań strumienia na końcach łopatek.



Rys. 7. Rozkład wektorów prędkości w komorze spiralnej wentylatora
Fig. 7. The distribution of velocity vectors in a spiral chamber of a fan

Otrzymane w trakcie badań numerycznych (symulacji) wartości ciśnień statycznych spiętrzenia wentylatora (sprężu) Δp_w poddano dalszej analizie i porównano z wynikami uzyskanymi podczas przeprowadzonych badań doświadczalnych. Rezultaty porównania przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Porównanie badań doświadczalnych sprężu wentylatora $\Delta p_w = f(q_v)$ z badaniami numerycznymi (symulacjami)
 Fig. 8. The comparison of experimental research of fan pressure $\Delta p_w = f(q_v)$ with numerical research (simulations)

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na wykonanym stanowisku badawczo-odbiorczym przeprowadzono badania wentylatora napędzanego silnikiem trójfazowym o mocy $N=0,55$ kW przy wybranych obrotach: 1400 obr/min., 2100 obr/min. i 2800 obr/min. W czasie badań stwierdzono, że produkowany wentylator promieniowy przy obrotach znamionowych silnika ($n=2800$ obr/min.) należy do grupy wentylatorów średnioprężnych o ciśnieniu spiętrzenia wynoszącym $\Delta p_w=1275$ Pa przy przepływającym strumieniu objętości $q_v=150$ m³/h, które maleje do wartości $\Delta p_w=830$ Pa przy przepływającym strumieniu objętości $q_v=1100$ m³/h. W badanym wentylatorze standardowa szczelina między króćcem ssawnym a tarczą wlotową wirnika wynosiła +1,0 mm. Z przeprowadzonych badań wielkości szczeliny wynika, że jej wzrost do +8,0 mm, powoduje znaczne pogorszenie parametrów wyjściowych wentylatora, natomiast wykonanie tylko niewielkiej zakładki polegającej na wprowadzeniu króćca wlotowego do wirnika na głębokość -3,0 mm powoduje polepszenie sprężu średnio o ok. 50 Pa w całym przebadanym zakresie charakterystyki spiętrzenia przy obrotach wirnika wentylatora wynoszących ok. $n=2800$ obr/min.

Otrzymane rezultaty z wykonanych badań numerycznych potwierdzają wiarygodność przyjętej metody symulacji w oprogramowaniu SolidWorks 2014 Flow Simulation w stosunku do bardzo czasochłonnych badań doświadczalnych. W przebadanym zakresie strumienia powietrza $q_v=150...1100$ m³/h, maksymalny błąd symulacji ciśnienia statycznego spiętrzenia (sprężu) na wentylatorze nie przekracza 5,5 %.

Uzyskane wyniki badań numerycznych uzasadniają kontynuację prac zmierzających do modernizacji produkowanego wentylatora jak i stanowiska pomiarowo-odbiorczego do jego odbioru.

STUDY OF RADIAL FANS

Summary: A measuring and receiving post for reception of produced radial fans (centrifugal with small shovels bent back) applied in exhaust systems of air polluted with various types of dust was presented in this article. A virtual measuring post created using SolidWorks software used to conduct numerical simulations in Flow Simulation software for the examined radial fan was presented. The results obtained from simulations were compared with results obtained in receiving tests of a radial fan, which were presented in a form of graphs of flow characteristics. Numerically determined simulations of pressure and velocity distribution in a flow passage of a measuring post and in the examined fan were also presented.

Literatura

- [1] Kuczewski, S.; *Wentylatory*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1978,
- [2] Kuczewski, S.; *Wentylatory promieniowe*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1966,
- [3] Nantka Marian B.; *Wentylacja z elementami klimatyzacji*, Wydaw. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2015,
- [4] Otte, J.; *Badania wysokosprawnych wentylatorów promieniowych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012,
- [5] PN-EN ISO 5167-1:2005; *Pomiar strumienia płynu za pomocą zwężek pomiarowych wbudowanych w całkowicie wypełnione rurociągi o przekroju kołowym Część 1: Zasady i wymagania ogólne*, PKN, Warszawa 2005,
- [6] PN-EN ISO 5167-2:2005; *Pomiary strumienia płynu za pomocą zwężek pomiarowych wbudowanych w całkowicie wypełnione rurociągi o przekroju kołowym – Część 2: Kryzy*, PKN, Warszawa 2005,
- [7] PN-EN ISO 5221:1994; *Metody pomiaru przepływu strumienia powietrza w przewodzie*, PKN, Warszawa 2008,
- [8] PN-EN ISO 5801:2008; *Wentylatory przemysłowe - Badania charakterystyk pracy na stanowiskach znormalizowanych*, PKN, Warszawa 2008,
- [9] Jayapragasan C.N., Manojkumar A., Dr Janardhan Reddy K.; *Design Optimization and Parametric Study on the Alternative Blower of Travelling Cleaner*, IJSET-International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology, Vol. 2 Issue 4, April 2015.