Jarosław BARTOSZEWICZ
Leon BOGUSŁAWSKI

PTNSS-2007-SS4-224

Analiza pola prędkości przepływu przez filtr powietrza

W pracy przedstawiono wyniki analizy przepływu powietrza przez filtr stosowany w układzie zasilania silnika spalinowego w celu uzyskania równomiernego przepływu przez wkład filtrujący. Analiza przepływu wykonana została przy użyciu kodu numerycznego Phoenics, który umożliwia rozwiązywanie układu równań transportu masy i pędu z uwzględnieniem wpływu turbulencji. W obliczeniach wykorzystano model turbulencji k-ε dla małych liczb Reynoldsa. Obliczenia numeryczne wykonano dla różnych strumieni masy powietrza przepływających przez filtr charakterystycznych dla silników stosowanych obecnie w samochodach osobowych europejskich i japońskich producentów. W pracy przedstawiono znormalizowane rozkłady wartości średnich prędkości oraz kinetycznej energii turbulencji w przekroju podłużnym podczas przepływu powietrza przez analizowany filtr powietrza dla różnych konfiguracji układu przepływowego. Przeprowadzone badania umożliwiły wytypowanie optymalnej konfiguracji układu przepływowego charakteryzującego się najbardziej wyrównanymi profilami prędkości.

Słowa kluczowe: *filtr powietrza, pole prędkości, modelowanie przepływu turbulentnego*

The analysis of flow velocity in an air filter

This paper presents the results of the analysis of field of flow velocity through an air filter used in a diesel engine inlet system performed in order to obtain equal flow through the filtering insert. The analysis of flow was performed with the use of Phoenics digital code, which makes it possible to solve the system of equations of weight and velocity and takes into account the effects of turbulence. The calculations used k-ε turbulence model for low Reynold's number. The digital calculations were performed for various streams of air mass flowing through the filter and characteristics of engines currently used in passenger vehicles manufactures by European and Japanese manufacturers. This paper presents standardized distributions of average velocity values and kinetic energy of turbulence in longitudinal section during the flow of air through the analyzed air filter and for various configurations of the flow system. The conducted tests made it possible to identify an optimum configuration for the flow system characterized by the most balanced profiles of velocity.

Key words: *air filter, velocity field, simulation of the turbulent flow*

1. Wstęp

W pracy przedstawiono wyniki badań umożliwiających modyfikację układu przepływowego filtra powietrza bez istotnych zmian jego układu dolotowego i wylotowego w celu uzyskania możliwie wyrównanego pola przepływu przez wkład filtrujący. Wyjściowa konfiguracja nawiązuje do konstrukcji filtra pełniącego rolę dodatkowego filtra dokonującego wstępnej separacji zanieczyszczeń dużej skali. Ze względu na ograniczenia spowodowane przez struktury zewnętrzne istnieją w takich sytuacjach bardzo ograniczone możliwości modyfikacji wymiarów zewnętrznych filtra. W związku z tym badania skoncentrowano na możliwości optymalizacji przepływu wewnątrz układu filtrującego. Na rysunku 1 przedstawiono prototyp filtra powietrza będącego obiektem badań. Konstrukcja z tworzywa sztucznego umożliwia jego łatwą modernizację w zależności od propozycji modyfikacji kształtu kanałów stanowiących efekt analiz eksperymentalnych i numerycznych. Zaprojektowany przez producenta filtr powietrza pokazany na rys. 1 był zasilany dolnym przewodem, a następnie przewężeniem kanału struga docierała do przestrzeni zajmowanej przez papierowy wkład filtracyjny.

Powietrze opuszczało filtr górą, kanałem o kształcie analogicznym do kanału dolotowego. Ze względu na dużą różnorodność możliwości konfiguracji przepływu przez

1. Introduction

This paper presents the results of tests that enable the modification of the air filter flow system without significant changes in the inlet and outlet systems. The tests were performed for the purpose of obtaining a reasonably balanced flow field through the filtering insert. The initial configuration refers to the design of filter serving as an additional filter for initial separation of large-scale particles. Due to the limitations caused by external structures, such situations are characterized by limited possibilities of modification of the filter external dimensions. Therefore the tests focused on the possibility of optimization of the flow inside the filtering system. Fig. 1 presents a prototype of the analyzed air filter. The plastic structure of the filter facilitates its modification depending on modification suggestions concerning the shape of ducts being the effects of experimental and digital analyses. The air filter designed by the manufacturer and shown in Fig. 1 was fed through its bottom connection. Subsequently, the stream was fed through the duct narrowing and into the space where a filtering insert made of paper was placed.

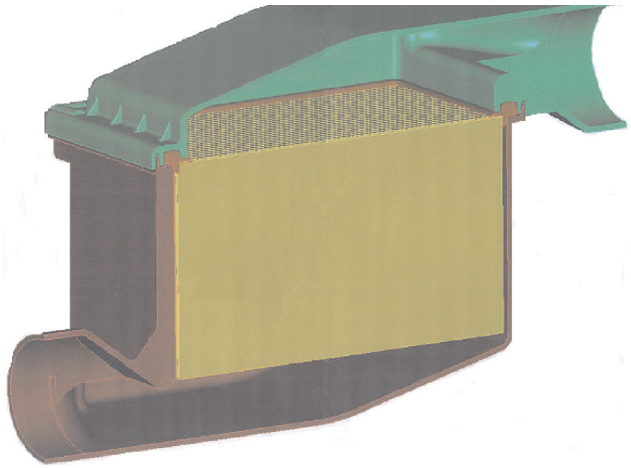
The air left the filter through the upper part of the duct with the shape analogous to that of the inlet duct. Due to large diversity of possibilities of flow configurations through the filtering inserts, the researchers decided to perform a digital simulation of the flow with various shapes of divi-

wkład filtrujący zdecydowano się na numeryczną symulację przepływu przy różnym ukształtowaniu przegród sterujących ruchem płynu. Badania eksperymentalne w analizowanym przypadku uznano za zbyt kosztowne i długotrwałe. Analiza numeryczna obejmuje rozwiązanie przy użyciu programu Phoenics przepływu powietrza poprzez prototyp filtra oraz filtry o zmodyfikowanych układach przepływowych zwiększających skuteczności ich pracy. Dane niezbędne do realizacji obliczeń numerycznych zgromadzono od producentów i dystrybutorów samochodów osobowych różnych marek. W tabeli 1 przedstawione są przykładowe wartości strumieni masy powietrza oraz prędkości powietrza w kanale dolotowym do filtrów dla różnych typów silników montowanych w samochodach osobowych i wyznaczonych dla prędkości jazdy 80 km/h i temperatury powietrza 20°C. Analizy numeryczne obejmujące procesy transportu masy, pędu i ciepła wymagają w przypadku przepływów turbulentnych użycia w obliczeniach pewnych hipotez upraszczających, które najczęściej bazują na fizykalnych obserwacjach ruchu turbulentnego płynu. W rozpatrywanym przypadku analizujemy układ równań wynikający z trzech zasad zachowania obejmujących przypadek przepływu stacjonarnego płynu ściśliwego, lepkiego i przewodzącego ciepło, w których występuje jedenaście niewiadomych, a równania zostały przekształcone do postaci równań transportu wielkości fizycznych. Układ równań transportu uzupełniony o sześć równań obejmujących: równanie stanu, równania opisujące siły masowe oraz równania określające lepkość i przewodność cieplną płynu stanowi zestaw równań rozwiązywanych w użytym programie Phoenics. Zestaw wszystkich równań tworzy układ zamknięty dla przepływów laminarnych. Sytuacja ulega jednak zmianie w przypadku przepływów turbulentnych. W związkach wynikających z zasad zachowania pojawiają się dodatkowe zmienne będące momentami

Tabela 1. Prędkości powietrza w kanale dolotowym filtra dla różnych silników używanych w samochodach osobowych

Table 1. The velocity of air in inlet channel for many engines use in car

Wersja silnika/*Engine version*	Typ/pojemność/ *Type/capacity*	Strumień masy powietrza/*Air mass stream* [kg/h]	Prędkość powietrza w kanale dolotowym filtra/*Air velocity in the filter inlet duct* [m/s]
Fire	1242 8v	181	8.48
	1368 8v	224	10.5
	1368 16v	262	12.3
GM FAM 0	Z 10 XEP	191	8.95
	Z 12 XEP	252	11.8
	Z 14 XEP	255	11.9
GM FAM 1	Z 18 XE	342	16.0
	Z 18 YG	342	16.0
DIESEL ENGINES	1910 8v JTD	480	22.5
	1910 16v JTD	550	25.8
	1.7 Ds	402	18.8
	1248 8(16)v JTD	320	15.0



Rys. 1. Prototyp filtra powietrza

Fig. 1. The prototype of air filter

sions controlling the fluid movement. The experimental tests performed for the analyzed case were deemed too costly and time-consuming. The digital analysis covers the flow of air through the filter prototype with the use of Phoenics program and filters with modified flow systems, which increase their operating effectiveness. The data necessary for the digital calculations were obtained from manufacturers and distributors of various makes of vehicles. Table 1 presents examples of air mass stream values and air velocity values in the inlet ducts for filters fitted in various passenger vehicles and designed for the driving velocity of 80 km/h and ambient temperature of 20°C. The digital analyses covering the processes of transport, velocity and performed in the case of turbulent flows require using certain simplifying hypotheses, which are often based on physical observations of the turbulent fluid movement. For the considered case we analyzed the system of equations resulting from the three principles of behavior, including the case of flow of stationary compressed fluid, viscous fluid and heat-conducting fluid. There are eleven unknowns in the equations, which were converted into the form of equations for the transport of physical values. The system of transport equations was supplemented with six equations including the equation of state, equations describing mass forces and equations describing viscosity and thermal conductivity of the fluid, which constitute a set of equations solved in the Phoenics program. The set of all equations constitutes a set, which is closed for laminar flows. However, the situation changes in the case of turbulent flows. In the relations resulting from the principles of behavior there are additional variables being moments with various values and types and, consequently, there are new variables in the system of equations. The excess of variables is balanced by the use of additional equations including equations of turbulence models. The presented paper used k-ε turbulence model for low Reynold's number.

2. Digital method

Phoenics program was used for digital calculations, in which the system of equations of transport of physical values was supplemented with the turbulence model. The

różnych rzędów i rodzajów, a co za tym idzie w układzie równań pojawiają się nowe zmienne. Zrównoważenie nadmiaru zmiennych odbywa się przez wykorzystanie dodatkowych równań, w skład których wchodzą równania modeli turbulencji. W prezentowanej pracy użyto modelu turbulencji k-ε dla małych liczb Reynoldsa.

2. Metoda numeryczna

Do obliczeń numerycznych użyto programu Phoenics, w którym układ równań transportu wielkości fizycznych uzupełniono modelem turbulencji. Opis metody numerycznej, na podstawie której realizowano obliczenia przedstawiono w pracach [1, 7]. W programie wszystkie równania transportu przekształcone są do uogólnionej postaci operatorowej równania transportu wielkości φ w formie

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi)+div\left(\rho\vec{U}\varphi-\Gamma\,grad\,\varphi\right)=S \qquad (1)$$

w której: t jest czasem, ρ – gęstością płynu, φ – poszukiwaną zmienną zależną (np. prędkość, temperatura, energia kinetyczna turbulencji, itd.), $\vec{U}$ jest wektorem prędkości, Γ – operatorem zależnym od poszukiwanej zmiennej zależnej φ, a S – operatorem źródła uzależnionym od poszukiwanej zmiennej zależnej φ. Program rozwiązuje układ równań algebraicznych powstałych z przekształcenia układu równań transportu. Związki te są wynikiem całkowania równań różniczkowych skończonej objętości komórek obliczeniowych. Algorytm poszukujący rozwiązania jest wspólny dla wszystkich niewiadomych i w formie ogólnej ma postać:

$$\varphi_P=\frac{a_1\varphi_1+a_2\varphi_2+a_3\varphi_3+a_4\varphi_4+a_5\varphi_5+a_6\varphi_6+a_T\varphi_T+S}{a_1+a_2+a_3+a_4+a_5+a_6+a_T+s} \qquad (2)$$

gdzie: symbole od a_1 do a_6 oznaczają strumienie masy transportowane przez ścianki komórki P, symbol T dotyczy wartości w analizowanej komórce P we wcześniejszym kroku czasowym czasu, a wielkość S wyraża wpływ źródeł w analizowanej komórce. Na rysunku 2 pokazano w formie graficznej komórkę obliczeniową w strukturze siatki obliczeniowej.

W wykonanych obliczeniach do wstępnych obliczeń wykorzystano model turbulencji k-ε dla dużych liczb Reynoldsa zaproponowany przez Laundera i Spaldinga [5], uwzględniający w stosunku do wcześniejszych wersji modeli modyfikacje równania opisującego szybkość dysypacji energii turbulencji uwzględniającą oddziaływanie ścian na przepływ. Model turbulencji stanowią trzy równania z zestawem uzupełniających je stałych.

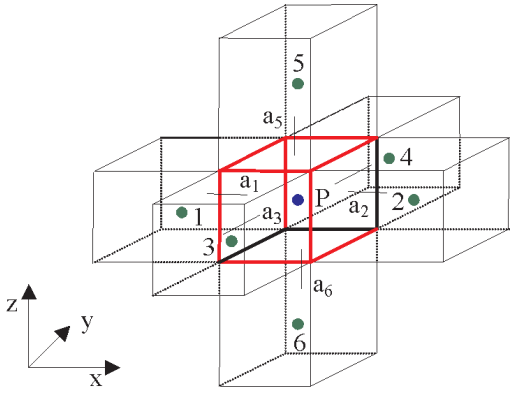
$$\frac{d(\rho\cdot k)}{dt}+\frac{d\left[\rho\cdot u_i\cdot k-\dfrac{\rho\cdot\nu_T}{\mathrm{Pr}_T(k)}\dfrac{dk}{dx_i}\right]}{dx_i}=\rho(P_k+G_k-\varepsilon) \qquad (3)$$

$$\frac{d(\rho\cdot\varepsilon)}{dt}+\frac{d\left[\rho\cdot u_i\cdot\varepsilon-\dfrac{\rho\cdot\nu_T}{\mathrm{Pr}_T(\varepsilon)}\dfrac{d\varepsilon}{dx_i}\right]}{dx_i}=\frac{\rho\cdot\varepsilon}{k}(C_1\cdot P_k+C_3\cdot G_k-C_2\cdot\varepsilon) \qquad (4)$$

description of the digital method forming the basis for the calculations was presented in papers [1, 7]. In the abovementioned program all transport equations are converted into the generalized operating form of transport equation of φ value in the following form (1),

where: t means time, ρ means fluid density, φ is the dependent variable sought for (e.g. velocity, temperature, kinetic energy of turbulence etc.), $\vec{U}$ is a velocity vector, Γ is the dependent operator for the dependant variable φ sought for, and S is the operator of the source contingent upon dependant variable φ. The program solves a system of algebraic equations resulting from the conversion of the system of transport equations. The relations result from the integration of differential equations of finite volume of calculation cells. The algorithm searching for the solution is common for all unknowns and has the following general form (2)

where: a_1 through a_6 stand for streams of mass transported through P cell walls, T symbol related to the value analyzed in P cell in the previous time pace and S value expresses the influence of sources in the analyzed cell. Fig. 2 presents a graphic form of the calculation cell within the structure of the calculation grid.



Rys. 2. Schemat metody objętości skończonych dla rozwiązywania równań zachowania pędu i energii

Fig. 2. Differential control volume for conservation equations of momentum and energy

The performed calculations used k-ε turbulence model for high Reynold's number as suggested by Launder and Spalding [5] taking into account, in relation to previous model versions, the modifications of the equation describing velocity of dissipation of turbulence energy considering the influence of walls upon the flow. The turbulence model consists of three equations with a set of constants supplementing the equations (3)–(5).

The set of equations numbered from (3) to (5) constitutes a system of closing equations in their generalized form in relation to the Cartesian coordinate system. In these equation k stands for kinetic energy of turbulence, ε stands for velocity of turbulence energy dissipation, ρ stands for fluid density and ν_T is a turbulent viscosity coefficient. P_k stands for the volume coefficient of production of turbulence kinetic energy resulting from the influence of shear forces in the fluid with a given compound, eq. (6)

$$\nu_T = \frac{C_\mu \cdot k^2}{\varepsilon} \tag{5}$$

Zestaw równań od (3) do (5) stanowi układ równań zamykających w postaci uogólnionej względem kartezjańskiego układu współrzędnych. W równaniach tych k oznacza kinetyczną energię turbulencji, ε jest to szybkość dysypacji energii turbulencji, ρ jest gęstością płynu, ν_T jest współczynnikiem lepkości turbulentnej. P_k jest objętościowym współczynnikiem produkcji kinetycznej energii turbulencji wnikającym z oddziaływania sił tnących w płynie, danym związkiem

$$P_k = \nu_T \left(\frac{dU_i}{dx_j} + \frac{dU_j}{dx_i} \right) \frac{dU_i}{dx_j} \tag{6}$$

a G_k jest objętościowym współczynnikiem produkcji kinetycznej energii turbulencji zależnym od g przyspieszenia ziemskiego oraz turbulentnej liczby Prandtla Pr_T. W ogólnym przypadku produkcja kinetycznej energii turbulencji G_k opisana jest równaniami

$$G_k = \nu_T \cdot \beta \cdot g \frac{\frac{dh}{dx_i}}{c_p \cdot \mathrm{Pr}_T(h)} \text{ lub } G_k = \nu_T \cdot \beta \cdot g \frac{\frac{dT}{dx_i}}{\mathrm{Pr}_T(T)} \tag{7}$$

gdzie c_p jest ciepłem właściwym przy stałym ciśnieniu, a β jest objętościowym współczynnikiem ekspansji. W ramach wykonanej analizy numerycznej wykorzystano stałe podane przez Laundera i Spaldinga, czyli

$$\mathrm{Pr}_T(k) = 1.0, \quad \mathrm{Pr}_T(\varepsilon) = 1.314, \quad C_\mu = 0.09,$$
$$C_1 = 1.44, \quad C_2 = 1.92, \quad C_3 = 1.0.$$

Ponieważ uzyskiwane wyniki klasyfikowały przepływy w grupie niskich liczb Reynoldsa, do ostatecznych obliczeń użyto modelu turbulencji Lama-Bremhorsta [4], będącego rozszerzeniem standardowego modelu k-ε na przypadki małych liczb Reynoldsa. Model ten jest najbardziej zbliżony postacią do standardowego dwurównaniowego modelu turbulencji k-ε dla dużych liczb Reynoldsa. Formuła modelu doczekała się kilku wersji, jedną z nich jest zaproponowana przez Patela [7], a następnie zmodyfikowana przez Devidsona [2] i Herrero [3]. Model turbulencji Lama i Bremhorsta różni się od standardowego modelu k-ε o stałe C_μ, C_1, C_2, które zostały zwielokrotnione do postaci

$$\mathrm{F}_\mu = [1 - \mathrm{e}^{-0.0165 \cdot \mathrm{Re_N}}]^2 \left(1 + \frac{20.5}{\mathrm{Re_T}} \right), \quad \mathrm{F}_1 = 1 + \left(\frac{0.05}{\mathrm{F}_\mu} \right)^3, \quad \mathrm{F}_2 = 1 - \mathrm{e}^{-\mathrm{Re_T^2}}$$

gdzie

$$\mathrm{Re}_N = \frac{\sqrt{k} \cdot y}{\nu_L}, \quad \mathrm{Re}_T = \frac{k^2}{\varepsilon \cdot \nu},$$

a y jest to odległość analizowanego węzła siatki od najbliższej ściany w kierunku normalnym. Dodatkowo autorzy

and G_k is the volume coefficient of production of turbulence kinetic energy contingent upon g standing for gravitational acceleration and turbulent Prandtl number – Pr_T. Generally, the production of turbulence kinetic energy G_k is described by means of the equations (7)
where c_p stands for specific heat at the constant pressure and β stands for the volume coefficient of expansion. As part of the performed digital analysis, the researchers used constants given by Launder and Spalding, i.e.

$$\mathrm{Pr}_T(k) = 1.0, \quad \mathrm{Pr}_T(\varepsilon) = 1.314, \quad C_\mu = 0.09,$$
$$C_1 = 1.44, \quad C_2 = 1.92, \quad C_3 = 1.0.$$

As the obtained results classified flows in the group of Reynold's low numbers, for the final calculations the researchers used Lam-Bremhorst's turbulence model [4] being an extension of the standard k-ε model to the cases of low Reynold's number. The model is the most approximate form of the standard double-equation k-ε turbulence model for Reynol's large figures. The model formula has several versions, one them being a version suggested by Patel [7], and subsequently modified by Devidson [2] and Herrero [3]. Lam and Bremhorst turbulence model differs from the standard k-ε model by C_μ, C_1 and C_2 constants, which were multiplied to obtain the following form

$$\mathrm{F}_\mu = [1 - \mathrm{e}^{-0.0165 \cdot \mathrm{Re_N}}]^2 \left(1 + \frac{20.5}{\mathrm{Re_T}} \right), \quad \mathrm{F}_1 = 1 + \left(\frac{0.05}{\mathrm{F}_\mu} \right)^3, \quad \mathrm{F}_2 = 1 - \mathrm{e}^{-\mathrm{Re_T^2}}$$

where

$$\mathrm{Re}_N = \frac{\sqrt{k} \cdot y}{\nu_L}, \quad \mathrm{Re}_T = \frac{k^2}{\varepsilon \cdot \nu}$$

and y stands for the distance of the analyzed grid knot to the nearest wall in normal direction. Additionally, the authors impose upon the model defining of edge conditions on the wall in the form of k = 0 and dε/dy = 0.

The assumed turbulence model makes it possible to identify directly two parameters describing the turbulence in the flow: turbulence kinetic energy and velocity of turbulence energy dissipation. The equations of the velocity turbulence model are obtained following a substitution of the following relations in the generalized equation (1):
– turbulence kinetic energy, eq. (8)
– the velocity of turbulence energy dissipation, EQ. (9).

3. The results of digital analysis

The digital calculations of the flow of air through the air filter prototype were performed for the purpose of obtaining a flow guaranteeing the most effective use of the filtering insert. To this effect, the researchers introduced a modification of shapes of the filter flow system with the assumption of its invariable width and distance between inlet and outlet sections. The analysis covered testing of velocity distribution within the filtering insert (which should be reasonably balanced), which was taken as a measure of optimal use of the insert.

narzucają dla modelu zdefiniowanie warunków brzegowych na ścianie w postaci k = 0 i dε/dy = 0.

Przyjęty model turbulencji pozwala na wyznaczenie w sposób bezpośredni dwóch parametrów opisujących turbulencję w przepływie: kinetycznej energii turbulencji i szybkości dysypacji energii turbulencji. Równania stosowanego modelu turbulencji uzyskuje się po podstawieniach do równania uogólnionego (1) poniższych związków
– kinetyczna energia turbulencji

$$\varphi = k, \quad \Gamma = \frac{\mu_t}{\sigma_k}, \quad S = \mu_t \left(\frac{\partial \overline{U}_z}{\partial y} + \frac{\partial \overline{U}_y}{\partial z} \right) \frac{\partial \overline{U}_z}{\partial y} - \varepsilon\rho \quad (8)$$

– szybkość dysypacji energii turbulencji

$$\varphi = \varepsilon, \quad \Gamma = \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon},$$

$$S = C_1 \mu_t \frac{\varepsilon}{k} \left(\frac{\partial \overline{U}_z}{\partial y} + \frac{\partial \overline{U}_y}{\partial z} \right) \frac{\partial \overline{U}_z}{\partial y} - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (9)$$

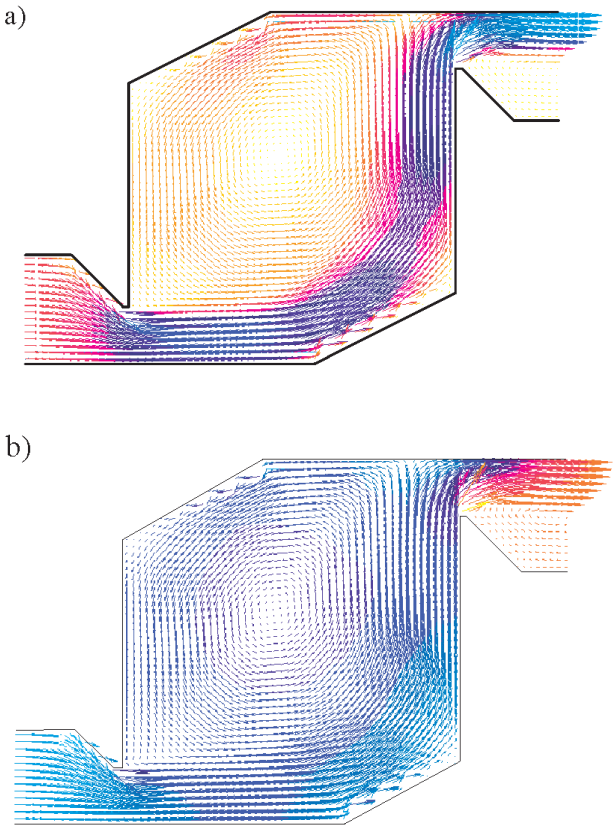
3. Wyniki analizy numerycznej

Obliczenia numeryczne przepływu powietrza przez prototyp filtra powietrza realizowano w celu uzyskania przepływu gwarantującego najbardziej efektywne wykorzystanie wkładu filtrującego. W tym celu wprowadzano modyfikacje kształtu układu przepływowego filtra przy założeniu niezmiennej jego szerokości oraz odległości pomiędzy przekrojami wlotowym i wylotowym. Analiza obejmowała badanie rozkładu prędkości w obrębie wkładu filtrującego, który powinien być jak najbardziej równomierny, co przyjęto za miarę dobrego wykorzystania wkładu.

Pierwsze wyniki obliczeń, realizowane dla typowych prędkości napływu powietrza w zakresie od 10 do 20 m/s, co wynika z zestawień przedstawionych w tab. 1, wykazały dużą nierównomierność przepływu w prototypowej konstrukcji. Struga powietrza, jak pokazano na rys. 3a, przyspiesza na dolnym przewężeniu i spływa wzdłuż dolnej powierzchni korpusu. Rozkład prędkości w kierunku podłużnym ukazuje w przybliżeniu stopień wykorzystania wkładu filtrującego. Struga powietrza przemieszczając się wzdłuż prawej powierzchni filtra zajmuje około 20% powierzchni wkładu, co jest wynikiem bardzo niezadowalającym. Dla porównania wykonano szereg obliczeń dla mniejszych prędkości napływu powietrza do filtra w celu określenia wartości granicznej, przy której osiągnięte będzie 100-procentowe wykorzystanie wkładu filtracyjnego bez zmiany geometrii przepływowej filtra. Na rysunku 3b pokazano wektory prędkości dla wartości prędkości w przekroju wlotowym równym 1 m/s. Przy tej prędkości dolotowej uzyskano bardzo wyrównany rozkład prędkości podczas przepływu przez wkład, ale jej uzyskanie w obiekcie rzeczywistym jest nierealne, gdyż wiązało by się z kilkukrotnym zwiększeniem gabarytów filtra.

W ramach wielowariantowych obliczeń numerycznych badano wpływ różnych czynników na charakter przepływu przez filtr powietrza. Do najważniejszych z nich należały:

The first results of the calculations made for typical velocities of air flow in the range from 10 to 20 m/s, which results from the statements presented in Table 1, showed considerable unevenness of the flow in the prototype. The air stream shown in Fig. 3a accelerates in the lower part of the narrowing and flows down along the bottom surface of the body. The velocity distribution in longitudinal direction shows approximate degree of the use of the filtering insert. The air stream flowing through the right surface of the filter occupies approximately 20% of the insert area, which is not a satisfactory result. For the purposes of comparison, the researchers made a series of calculations for lower velocities of air flow into the filter and in order to determine the limit value, for which the filtering insert will be used in 100% without any changes in the filter flow geometry. Fig. 3b shows velocity vectors for the velocity value in the inlet section equaling 1 m/s. For the flow velocity the researchers obtained a very equal velocity distribution during the flow through the insert. However, it is unreal to obtain such a value in the real object, as this would entail increasing of the filter dimensions by several times.



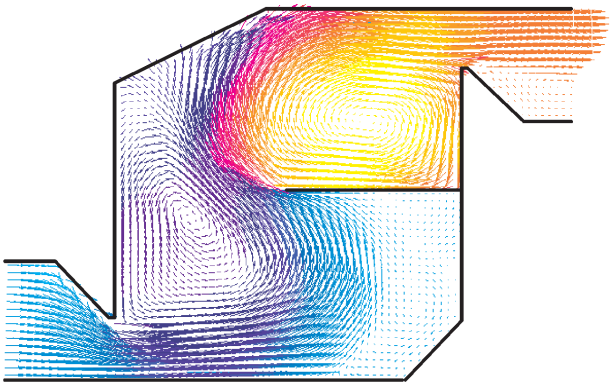
Rys. 3. Wektory prędkości w prototypie filtra przy prędkościach w przekroju wlotowym: a) 10 m/s, b) 1 m/s

Fig. 3. The vectors of velocity in prototype of filter for velocity at inlet cross-section: a) 10 m/s, b) 1 m/s

As part of multi-variant digital calculations, the researchers tested the influence of various factors upon the nature of flow through the air filter. The most significant among them were: searching for the velocity, for which the stream will flow through the middle of the insert, the influence of

poszukiwanie prędkości, przy której struga przemieszczać się będzie środkiem wkładu, wpływ ukosowania dolnej i górnej pokrywy filtra oraz możliwość wykorzystania przegród w filtrze wielosegmentowym. Na rysunku 4 przedstawione są wektory prędkości przy przepływie powietrza przez filtr dwuczęściowy z przegrodą usytuowaną w połowie wysokości filtra. Dzielenie wkładu filtracyjnego jest prostą czynnością i nie zwiększa istotnie kosztów produkcji ani montażu. Krawędź dolna filtra została wydłużona, górna pokrywa filtra nie została zmodyfikowana. W przedstawionej na rys. 4 konstrukcji nie modyfikowano przewężeń na wlocie i wylocie z filtra. Dzielenie wkładu filtracyjnego nie zapewnia całkowitego powodzenia, ponieważ w górnej części filtra struga powietrza w znacznej części pozostaje poza wkładem w obszarze komory zbiorczej.

Ostatni etap badań poświęcony był modyfikacji górnej pokrywy filtra. Na rysunku 5 przedstawiono wynik obliczeń numerycznych dla pokrywy zmodyfikowanej na 2/3 długości. W tym rozwiązaniu papierowy wkład filtracyjny opiera się na pokrywie górnej, a struga powietrza recyrkuluje w obrębie wkładu.



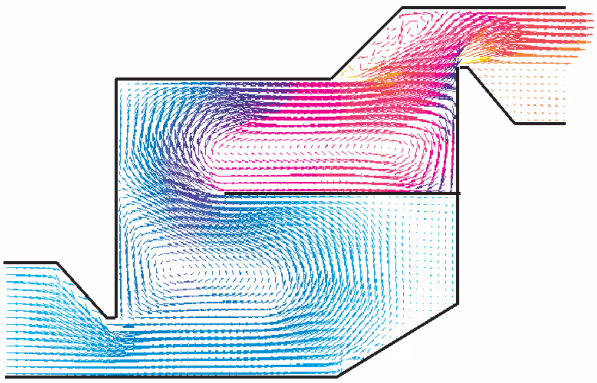
Rys. 4. Wektory prędkości w filtrze dla podzielonego wkładu filtrującego
Fig. 4. The vectors of velocity for divided filter element

Rozkłady wektorów prędkości pokazane na rysunkach 3, 4 i 5 służą jedynie do jakościowej oceny skuteczności działania filtra. W przypadkach weryfikacji ilościowych należy posłużyć się rozkładami izolinii składowych prędkości wzdłużnej i poprzecznej. Na rysunkach 6 i 7 pokazano przykładowe rozkłady prędkości znormalizowanej przez wartość maksymalną w danym polu. Oznacza to, że wartość 1 odpowiada obszarowi, w którym struga powietrza ma największą prędkość zgodną z przyjętą wzdłużna osią współrzędnych, a wartość –1 – obszarowi o maksymalnej prędkości ze zwrotem przeciwnym do kierunku osi współrzędnych. Ten sposób prezentacji rozkładów prędkości średnich w czasie pozwala na równoczesną ocenę lokalnych strumieni masy przepływających w filtrze. Przy zachowaniu stałej gęstości powietrza, założenie poprawne dla analizowanych prędkości, lokalny strumień masy zależy jedynie od lokalnej wartości prędkości, którą uzyskamy przez sumowanie składowych wektora prędkości wzdłużnej i pionowej. Można więc rozkłady pokazane na rysunkach 6 i 7 traktować jako obraz

beveling of the lower and upper cover of the filter and the possibility of use of divisions in a multi-segment filter. Fig. 4 presents velocity vectors for airflow through the filter consisting of two parts and a division located halfway to its top. Dividing of the filtering insert is a simple activity, which does not significantly increase the production or assembly costs. The lower edge of the filter was elongated, whereas the upper cover of the filter was not modified. In the design presented in Fig. 4 no modifications were made in the narrowing at the filter inlet and outlet. Dividing of the filtering insert does not ensure success due to the fact that in the upper part of the filter a considerable amount of air stream is outside the insert in the area of the collective chamber.

The last stage of tests was devoted to modification of the upper cover of the filter. Fig. 5 presents a result of digital calculations made for the cover with its 2/3 of the length modified. In this solution the filtering insert made of paper rests on the upper cover, whereas the air stream recirculates within the system.

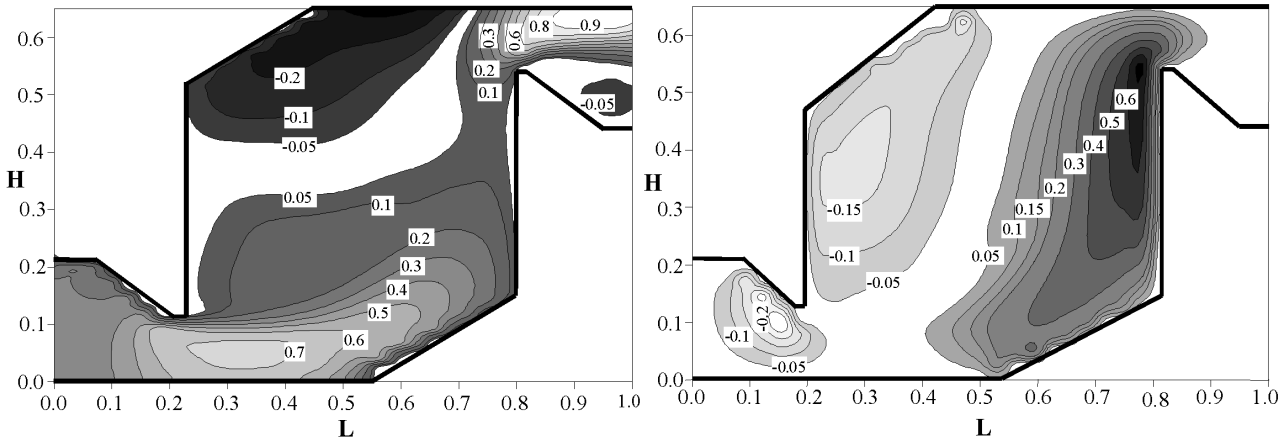
The distributions of velocity vectors as shown in figures 3, 4 and 5 merely serve the purpose of qualitative evaluation of effective operation of the filter. In the cases of quantitative verifications, one should use distributions of component isolines of longitudinal and cross-sectional velocities. Fig. 6 and 7 show examples of distributions of velocities standardized by a maximum value for the given field. This means that the value 1 corresponds to the area, in which the air stream has the highest velocity in accordance with the assumed longitudinal coordinate axis and the value -1 for the area with maximum velocity with direction opposite to the direction of coordinate axis. This method of presentation of average velocity distributions in time allows a simultaneous evaluation of local mass streams flowing through the filter. With maintenance of constant air density, being an assumption proper from the analyzed velocities, the local mass stream depends merely on the local velocity value, which is obtained by adding components of vectors of longitudinal and vertical velocities. Thus we may treat the distributions presented in fig. 6 and 7 as a picture of the mass stream flowing through the filter. The axes of ordinates and abscissae were standardized by the largest measurement characteristic of the filter, i.e. its length.



Rys. 5. Wektory prędkości w filtrze dla zmodyfikowanej pokrywy
Fig. 5. The vectors of velocity for modification of cover

strumienia masy przepływającego przez filtr. Osie rzędnych i odciętych znormalizowano poprzez największy wymiar charakterystyczny filtra, czyli jego długość.

The first stage of the air filter modification covered dividing of the filtering insert. The division was fitted at three relative heights – 25, 50 and 75%. The height of 50%



Rys.6. Izolinie prędkości w prototypowym filtrze powietrza: a) składowa wzdłużna, b) składowa pionowa

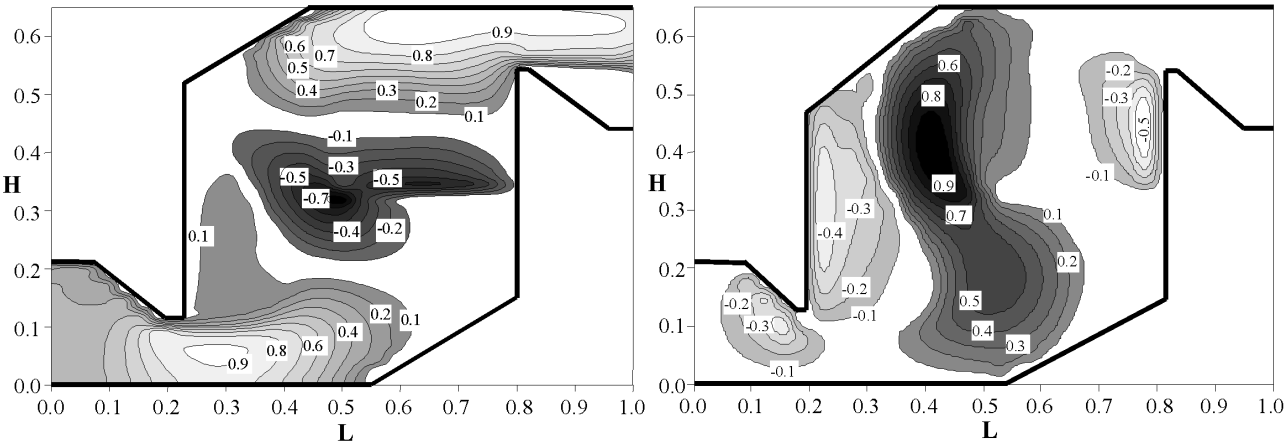
Fig. 6. Isolines of velocity in prototype of air filter: a) longitudinal component, b) vertical component

Pierwszy etap modyfikacji filtra powietrza obejmował dzielenie wkładu filtracyjnego. Przegroda montowana była na trzech względnych wysokościach 25, 50 i 75%. Za najbardziej optymalną uznano wysokość 50% wysokości, czyli podział wkładu filtrującego na połowę, co gwarantuje najbardziej równomierny rozkład strumieni masy. Uzyskane wyniki pozwalają na wyciągnięcie wniosków, iż taka modyfikacja może wyraźnie poprawić pracę wkładu filtrującego, ale w dalszym ciągu istnieją obszary filtra mało lub bardzo mało obciążone, co pokazuje rys. 6a. Struga wpływając ponad wkład filtracyjny dociera do pokrywy górnej i wzdłuż niej spływa do wylotu filtra.

Ostatni etap analiz numerycznych poświęcono obliczeniom przepływu powietrza, gdy kształt pokrywy dolnej i górnej modyfikowano w celu właściwszego ukierunkowania przepływu powietrza. Pokazany na rys. 5 kształt korpusu filtra uznano za najwłaściwszy z powodu optymalnego wykorzystania wkładu filtracyjnego przy równoczesnej minima-

was considered as most optimum dividing the filter by half, which guaranteed the most even distribution of mass streams. The obtained results make it possible to conclude that such a modification may considerably improve the operation of the filtering insert. However, there are still areas in the filter, which are burdened to little or very little extent as shown in Fig. 6a. The stream, which flows over the filtering insert, gets to the upper cover and flows down along the upper cover into the filter outlet.

The last stage of the digital analyses was devoted to calculations of air flow with the shape of upper and lower cover modified for the purpose of the most appropriate orientation of the flow of air. The shape of filter body shown in Fig. 5 was deemed most appropriate due to the optimum use of the filtering insert with simultaneous minimization of the investment costs in the technological process connected with the modification of the enclosure shape.



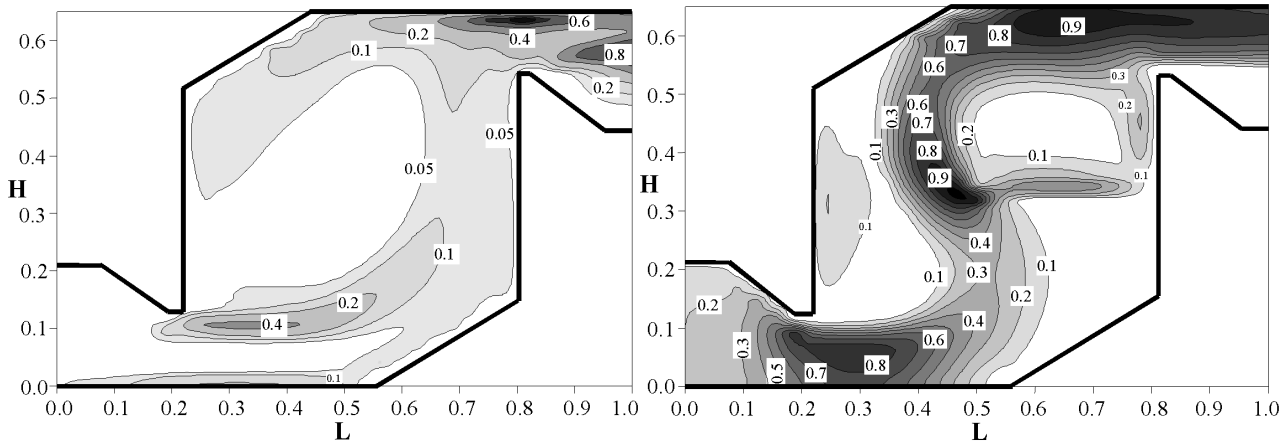
Rys. 7. Izolinie prędkości w filtrze z dzielonym wkładem: a) składowa wzdłużna, b) składowa pionowa

Fig. 7. Isolines of velocity in filter with divided filter element: a) longitudinal component, b) vertical component

lizacji kosztów inwestycyjnych w procesie technologicznym związanych z modyfikacją kształtu obudowy.

W trakcie prowadzonych analiz każdorazowo wykonywano ocenę zmian wartości kinetycznej energii turbulencji, która, będąc jednym z parametrów modelu turbulencji, służy do oceny miejsc pojawienia się zawirowań, ich przemieszczania w formie śladu aerodynamicznego oraz wartości stopnia turbulencji wpływającej na wzrost oporów przepływu. Rozkład tego parametru umożliwia również ocenę szybkości zużywania się elementów konstrukcyjnych maszyny. W tym kontekście przykładowy rozkład kinetycznej energii turbulencji przedstawiony na rys. 8 pokazuje schemat analizy oraz możliwości interpretacyjne. Na rysunku 8a zobrazowany jest rozkład w prototypie filtra. Struga powietrza, przepływając przez dolne przewężenie kieruje się ku tylnej ścianie filtra na skutek bezwładności oraz blokady w postaci śladu aerodynamicznego powstającego na spływie z przewężenia. Struga po zmianie głównego kierunku przepływu uderza w pokrywę górną filtra i rozdziela się na dwa strumienie: w kierunku wylotu oraz w kierunku ściany przedniej filtra. Niezwykle istotny jest obraz uzyskiwany za górnym przewężeniem. Rozszerzenie przekroju kanału jest zbyt gwałtowne i struga zamiast wypełniać cały przekrój poprzeczny odrywa się na

In the course of the conducted analyses, evaluations were made for each change of value of kinetic turbulence energy, which, being one of the parameters of the turbulence model, is used for the evaluation of areas, in which swirls occurred, migration of swirls in the form of an aerodynamic trace and the value of turbulence affecting the increase of flow resistances. The distribution of the parameter makes it also possible to evaluate the velocity of wear of the structural elements of the machine. In this context the example of kinetic energy turbulence presented in Fig. 8 shows the analysis diagram and interpretation possibilities. Fig. 8a presents an image of the distribution in the filter prototype. The air stream flowing through the lower narrowing is directed to the back wall of the filter due to inertia and blockade in the form of an aerodynamic trace formed at the flow from the narrowing. Following the change of the main direction, the stream hits the upper cover of the filter and is divided into two streams: one in the direction of the outlet and the other in the direction of the front wall of the filter. The image obtained behind the upper narrowing is extremely important. The extension of the duct section is too violent and the stream detaches at the edge



Rys. 8. Rozkład kinetycznej energii turbulencji w: a) prototypie filtra, b) filtr z dzielonym wkładem

Fig. 8. Distributions of kinetic energy of turbulence in: a) prototype of air filter, b) filter with divided filter element

krawędzi przewężenia w postaci śladu aerodynamicznego. W związku z tym w celu wyrównania rozkładu prędkości za filtrem należy zastosować prostownicę, albo zamontować kanał o długości powyżej dziesięciokrotnej wartości średnicy w celu jego wyrównania.

Na rysunku 8b pokazano rozkład kinetycznej energii turbulencji w filtrze z dzielonym wkładem na wysokości względnej 50%. Jak pokazano na rysunku, istnienie dolnego śladu aerodynamicznego wpływa korzystnie na funkcjonowanie filtra, ponieważ struga powietrza dociera do środkowej części wkładu filtracyjnego bez konieczności montowania dodatkowych przesłon na dolnej części wkładu filtracyjnego. Na przykładzie tych dwóch rozkładów widać, że analiza rozkładów parametrów turbulencji może w znacznym stopniu wspomagać zrozumienie zjawisk zachodzących w przepły-

of the narrowing in the form of an aerodynamic trace instead of filling in the entire cross section. As regards the above and for the purpose of balancing of the velocity distribution behind the filter, one should use a leveling machine or install a duct with the length over ten times greater than the value of the diameter.

Fig. 8b shows the distribution of kinetic turbulence energy in the filer with divided filtering insert installed in the relative height of 50%. As shown in the drawing, the presence of the lower aerodynamic trace has positive influence upon the functioning of the filter, as the air stream gets to the middle part of the filtering insert without the necessity of fitting any additional flaps in the lower part of the filtering insert. As shown in the examples of the two distributions, the analysis of distributions of turbulence parameters may

wowych elementach maszyn i stanowić ważne uzupełnienie informacji pochodzących z rozkładów wartości średnich.

4. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych zaproponowano nową geometrię części przepływowej filtra uwzględniającą dwie zasadnicze modyfikacje. Pierwsza obejmowała rozdzielenie wkładu filtracyjnego na dwie części i zamontowanie papierowej przegrody na względnej wysokości 50% blokującej przepływ na 50% przekroju poprzecznego filtra. Druga modyfikacja obejmowała kształt pokrywy górnej korpusu filtra. Zachowano w ten sposób niezmodyfikowany kształt korpusu, co odpowiada kryterium minimalizacji kosztów inwestycyjnych lokowanych w procesie produkcyjnym istniejącego już filtra. Próby wykonane z wykorzystaniem filtra o zmodyfikowanym kształcie układu przepływowego zakończyły się powodzeniem. Filtr wstępny, zmodyfikowany w oparciu o obliczenia numeryczne, spełnił stawiane mu zadanie skutecznej separacji zanieczyszczeń dużej skali. Przeprowadzone symulacje numeryczne układu przepływowego zweryfikowane badaniami eksploatacyjnymi wykazały efektywność metod numerycznych z wykorzystaniem modeli turbulencji do rozwiązywania problemów występujących w układach przepływowych maszyn i urządzeń. Użycie tych metod znacznie przyspiesza opracowanie konstrukcji i zmniejsza koszty przygotowania produkcji.

considerably support the understanding of the phenomena occurring in the flow elements of machines and may constitute an important supplement to the information resulting from the distribution of average values.

4. Conclusions

On the basis of simulations conducted, the researchers suggested a new geometry of the flow part of the filter taking into account two basic modifications. The first of them involved dividing of the filtering insert into two parts and installation of a paper division at the relative height of 50% blocking the flow in 50% of the cross section of the filter. The other modification is related to the shape of the upper cover of the filter. In this way non-modified shape of the body was preserved, which complies with the criteria of minimization of the investment costs incurred in the production process of the existing filter. The tests performed with the use of the filter with a modified shape of the flow system proved successful. The initial filter, which was modified on the basis of digital calculations, fulfilled the requirement of effective separation of large-scale particles. The digital simulations of the flow system verified by operating tests proved the effectiveness of the digital methods using turbulence models for solving problems occurring in the flow systems of machines and equipment. The use of such methods considerably accelerates the development of the design and decreases the costs of preparation for production.

Artykuł recenzowany

Literatura/*Bibliography*

[1] Bartoszewicz J., Modelowanie strugi osiowosymetrycznej, Praca doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań, 2000.
[2] Davidson L., Calculation of the turbulent buoyancy-driven flow in a rectangular cavity using an efficient solver and two different low Reynolds number k-□ε turbulence models. Numerical Heat Transfer, Part A, Volume 18, 1990, s. 129.
[3] Herrero J., Grau F.X., Grifoll J., Girault F., A near-wall k-ε formulation for high Prandtl number heat transfer. Inter. Journal of Heat Transfer, No. 3, Volume 34, 1991, s. 711.
[4] Lam C.K.G., Bremhorst K., A modified form of the k-□ε model for predicting wall turbulence. ASME Journal of Fluids Engineering, Volume 103, 1981, s. 456.
[5] Launder B.E., Spalding D.B., 1974, The numerical computation of turbulent flows, Comp. Meth. In Appl. Mech. & Eng., Vol. 3, pp. 269.
[6] Mansole D.M., Lage J.L., Nonuniform grid accuracy test applied to natural-convection flow within a porous medium cavity. Num. Heat Trans., Part B, Volume 23, 1993, s.351.
[7] Patel V.C., Rodi W., Scheurer G., Turbulence models for near-wall and low-Reynolds-number flows, A review. AIAA J, No. 9, Volume 23, 1984, s.1308.
[8] Rosten H.I., Spalding D.B., The PHOENICS beginners guides. CHAM report. No TR100, CHAM Limited, Wimbledon, England, 1985.

Dr inż. Jarosław Bartoszewicz – adiunkt na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej, Katedra Techniki Cieplnej.

Mr. Jarosław Bartoszewicz, PhD. MEng. – doctor in the Faculty of Working Machines and Vehicles at Poznan University Technology, Chair of Thermal Enginnering

Prof. dr hab. inż. Leon Bogusławski – profesor na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej, Katedra Techniki Cieplnej.

Mr. Leon Bogusławski, DSc. PhD. MEng. – Profesor in the Faculty of Working Machines and Transportation at Poznań University Technology, Chair of Thermal Engineering