

RESEARCH OF PNEUMATIC DISTRIBUTORS FOR LAUNCHER OF UNMANNED AERIAL VEHICLE (UAV)

BADANIA ELEMENTÓW STEROWANIA PNEUMATYCZNYCH WYRZUTNI STARTOWYCH BEZZAŁOGOWYCH STATKÓW POWIETRZNYCH (BSP)

Paweł Szczepaniak, Michał Józko

Air Force Institute of Technology, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

Abstract: *The test stand for investigations of flow characteristics of pneumatic distributor has been presented in this paper. This test stand has been composed as requirements include in standard PN-92/M-73763. The results of experimental and simulation investigations for standard five ways and two position pneumatic distributor have been presented. In simulations have been used CFD of SolidWorks Flow Simulation application. Flow characteristic of pneumatic distributor is necessary for design process of special pneumatic circuits of UAV launchers. CFD methods allow specify flow characteristics. Simulation research allow effective pneumatic components modification, whose used of special pneumatic circuits of UAV launchers. Results of experimental and simulation investigations were analyzed and compared.*

Keywords: *pneumatic launcher, pneumatic distributor, simulation investigations*

Streszczenie: *W publikacji przedstawiono stanowisko do badań parametrów przepływowych rozdzielaczy pneumatycznych, opracowane zgodnie z wytycznymi normy PN-92/M-73763. Przedstawiono i omówiono wyniki badań eksperymentalnych i symulacyjnych dla typowego rozdzielacza pneumatycznego pięciodrogowego, dwupołożeniowego produkcji polskiej. Badania symulacyjne przeprowadzono z wykorzystaniem metod CFD, z użyciem aplikacji SolidWorks Flow Simulation. Charakterystyki przepływowe elementów pneumatycznych niezbędne są w procesie projektowania układów pneumatycznych specjalnego przeznaczenia, tak jak w przypadku instalacji pneumatycznej wyrzutni startowej. Metody symulacyjne pozwalają określić te charakterystyki. Badania symulacyjne umożliwiają również wydajne modyfikowanie elementów pneumatycznych w aspekcie ich wykorzystania w urządzeniach specjalnego przeznaczenia. Dokonano porównania wyników badań uzyskanych doświadczalnie i metodami symulacyjnymi oraz sformułowano wnioski końcowe.*

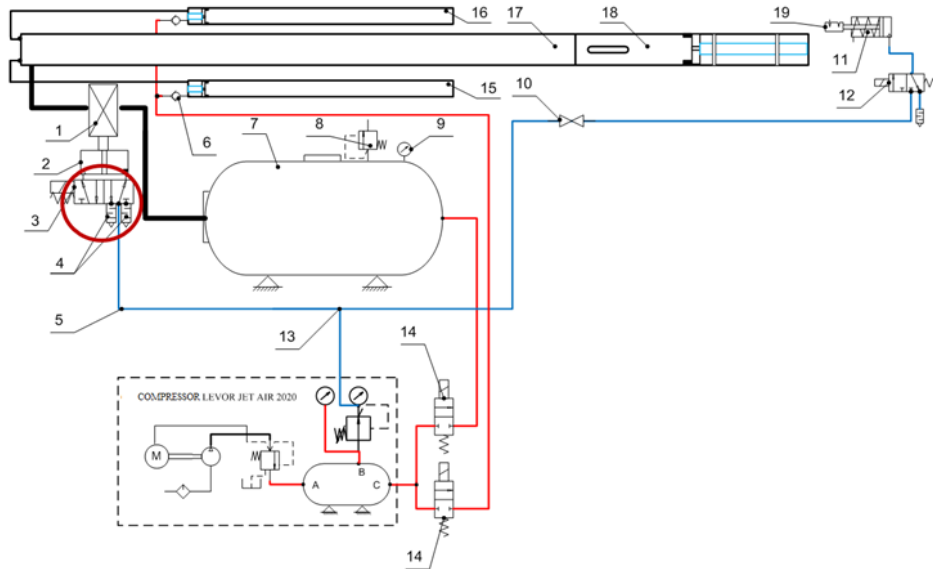
Słowa kluczowe: *pneumatyczna wyrzutnia startowa, rozdzielacz pneumatyczny, badania symulacyjne.*

1. Introduction

Design of new launchers for unmanned aerial vehicle is related to the dynamic development in this areas of aviation. This equipment popularly is called UAV launcher. Application of UAV launcher increases the possibility of using and eliminates need to use the runway. One of ITWL's (Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych – Air Force Institute of Technology) areas of interest are design and research pneumatic systems in the use of UAV launchers. The principle of operation UAV launcher is expansion of compressed air. Compressed air is accumulated in main tank (fig. 1, pos. 7). Expansion of air drives the piston in „start cylinder” (fig. 1, pos. 17), if main valve is open. The results of experimental research conducted in ITWL showed the impact of the pressure drop in the pneumatic controls for performance parameters UAV launcher (useful energy). Resistance of pneumatic control components affect for time of actions pneumatic system. Dissipation of useful energy (which accumulated in main tank) depends of time of action pneumatic system [2]. The major challenge of investigations of pneumatic systems for UAV launcher is determine the flow characteristics of pneumatic control components and improve their parameters through modifications of geometry. Particular attention in the range of investigations directed to five ways and two positions electropneumatic distributor (fig. 1, pos. 3), whose control pneumatic angle actuator (fig. 1, pos. 2). This electropneumatic distributor was subject of experimental and simulation research in this paper. Pneumatic angle actuator used to open main ball valve (fig. 1, pos. 1), which open way compressed air of main tank (fig. 1, pos. 7) to „start cylinder” (fig. 1, pos. 17) [1, 2, 7]. Execution of complete investigations of pneumatic system of UAV launcher require research the values of time of action main ball valve and dissipation of air pressure compressed in main tank The more time elapses for to open main valve, air pressure decreases, and the useful pneumatic energy is losses. These processes are directly related for resistance of control components in power pneumatic system. Flow characteristics of pneumatic resistance element is relationship between mass flow or volume flow to pressure ratio.

The practical problems use three type of models flow characteristics of pneumatic resistance element [12]:

- I. Systems of differential and integral equations. These systems composed with the primary rules of fluid mechanics and based on Navier-Stokes equations. These equations are solved with numerical methods for defined initial and boundary conditions – Computational Fluid Dynamics (CFD).
- II. „Normal flow models” and „relative flow models”. These models are composed for relationship between pressure drop of pneumatic component and volume flow or nominal volume flow. These relationships are presented on the graphs [4].
- III. „Flow coefficients models”. These models base for nonlinear pressure and temperature functions for inlet pneumatic component and pressure outlet component. Parameters of these functions are called „flow coefficient”. Values of „flow coefficients” are determined for experimental investigations [5].



*Fig. 1 Scheme of the pneumatic system of UAV launcher:
 1 – main ball valve, 2 – pneumatic angle actuator, 3 – five ways, two position pneumatic distributor, 4 – silencers, 5 – pneumatic power control line, 6 – one way valve, 7 – main tank of compressed air, 8 – safety valve, 9 – manometer, 10 – nipple, 11 – pneumatic actuator, 12 – three ways, two position pneumatic distributor, 13 – three way adapter, 14 – two ways, two position pneumatic distributor, 15, 16 – „brake cylinders”, 17 – „start cylinder”, 18 – „start cylinder” with bumper, 19 – mechanical lock of trolley starter [2]*

Criterion of mass or volume flow for pneumatic component is compatibility experimental and simulation research values.

The models of first group (CFD) seem to be unbeatable. Investigations of CFD models require the big skills of researcher. The values of CFD investigations don't have application for integration pneumatic systems with standard components. CFD methods are limited for analyze flow dynamics in time of design of channel in new component or the modification existing of pneumatic components.

Generally, new pneumatic components are design with use models of the second and third groups. It is sufficient this of the technical point of view and accuracy of the results.

2. Experimental research

Pneumatic energy and control signals are forwarded by compressed gas in pneumatic systems. Pneumatic components have „resistance properties”. These properties affect to change volume flow value in the pneumatic system.

Flow properties being used to describe flow parameters. These properties are obtained of experimental research.

The existing standards: PN-EN 60534, EN 60534, ISO 6358, PN-92/M-73763, ISO 6953, ISO/WD 6358 and ISO/DIS 6358 have been used for estimate flow coefficient with the use directly methods [12].

Scheme the stand for research of five ways, two positions and three ways, two positions pneumatic distributor valves is presented in figure 2. The stand for research pneumatic components is designed of requirements for standard PN-92/M-73763.

The example of stand for research resistance pneumatic components have been presented on the figure 3. This stand is composed with standard requirements but constructional solutions are original achievements of authors [12].

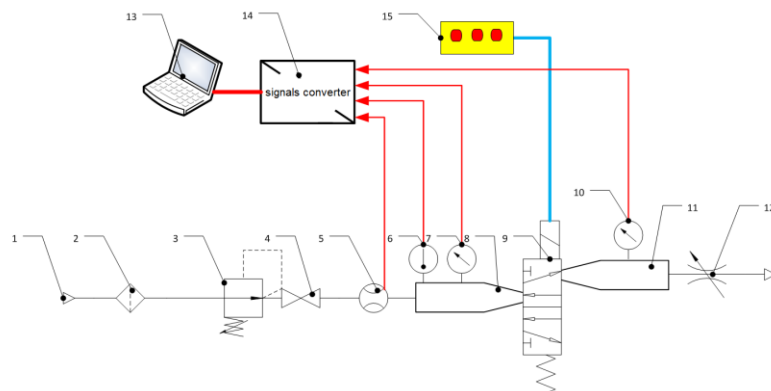


Fig. 2 Scheme stand for research of five ways, two positions and three ways, two positions pneumatic distributor valves: 1 – source of compressed air, 2 – filter, 3 – reduction valve, 4 – shut-off valve, 5 – flowmeter, 6 – temperature sensor, 7 – pressure sensor, 8 – measuring pipe, 9 – subject of research, 10 – pressure sensor, 11 – measuring pipe, 12 – throttle valve, 13 – computer, 14 – signals converter, 15 – control panel [12]

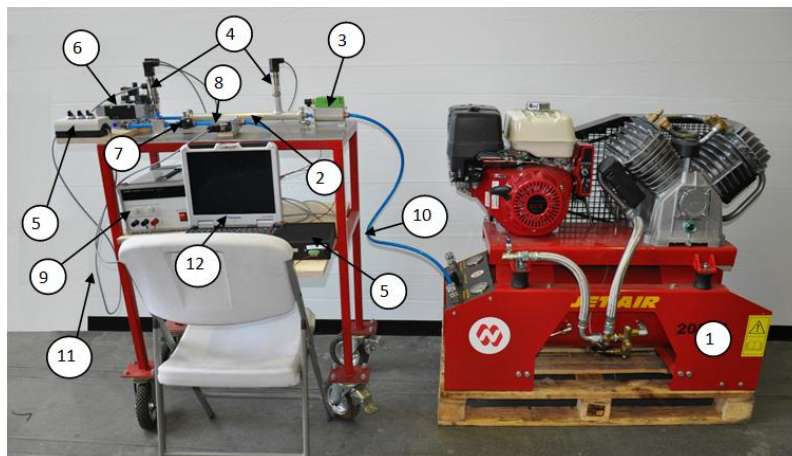


Fig. 3 View of the stand for research of five ways, two positions and three ways, two positions pneumatic distributor valves: 1 – piston compressor with equipment, 2 – measuring pipe, 3 – thermo-anemometric flowmeter, 4 – pressure and temperature sensors, 5 – control panel, 6 – subject of research, 7 – regulated throttle valve, 8 – shut-off valve, 9 – laboratory power supply, 10 – pneumatic pipe, 11 – signal and supply wires, 12 – computer [12].

The results of investigations of valve 611.012.720 (1/8"), which are produced in Poland (OŚRODEK BADAWCZO ROZWOJOWY ELEMENTÓW I UKŁADÓW PNEUMATYKI Sp. z o.o.), have been presented in table 1. Complete characteristic of change mass flow q_m , air pressure of inlet distributor valve p_1 , air pressure of outlet distributor valve p_2 , air temperature T_1 in measuring pipe in front of distributor valve have been presented in figure 5.

Tab. 1 Results values of research distributor valve 5/2 [12]

Catalog number of research distributor valve: 611.012.720 1/8"				
Initial mass flow % q_m^*	Mass flow q_m [kg/h]	Inlet pressure p_1 [MPa]	Outlet pressure p_2 [MPa]	Air temperature T_1 [°C]
100	73,80	0,72	0,30	12
80	58,50	0,98	0,94	13
60	44,70	1,09	1,07	14
40	29,50	1,08	1,07	15
20	14,90	1,12	1,12	15

Standard PN-92/M-73763 specified range of ratio values p_2/p_1 which value mass flow q_m does not decrease. This range is critical flow area (Fig. 4).

If the pressure ratio p_1/p_2 is large enough and the value of the mass flow q_m decreases, then flow is subcritical (Fig. 4) [6]. Analogical, if cross-sectional area outlet pipe of distributor is reduced (pressure increases) and mass flow is constant, this range of parameters is area of critical flow.

Efficiency of compressor was too low to reach standards parameters, which have been described above.

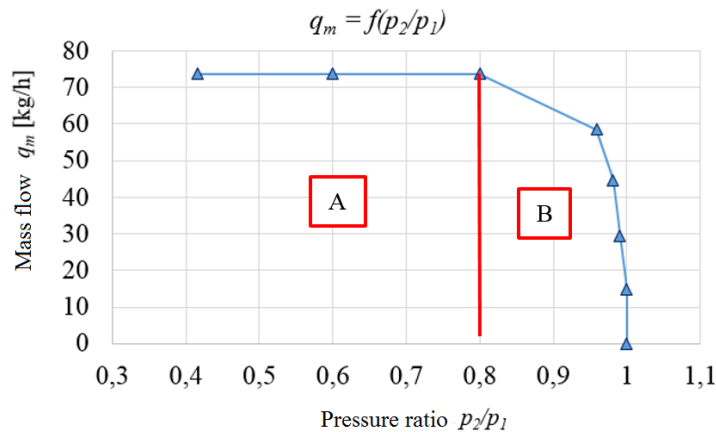


Fig. 4 Experimental characteristic of mass flow q_m and pressure ratio p_2/p_1 :
A – area of critical flow, B – area of subcritical flow

Critical flow is reached in the range 22÷75s, in the characteristic of flow and pressure changes (Fig. 5). The symptom achieved the critical flow is shown the local sound velocity of gas [3, 6], which for air (temperature 15°C) is approximately 340,3 m/s [8].

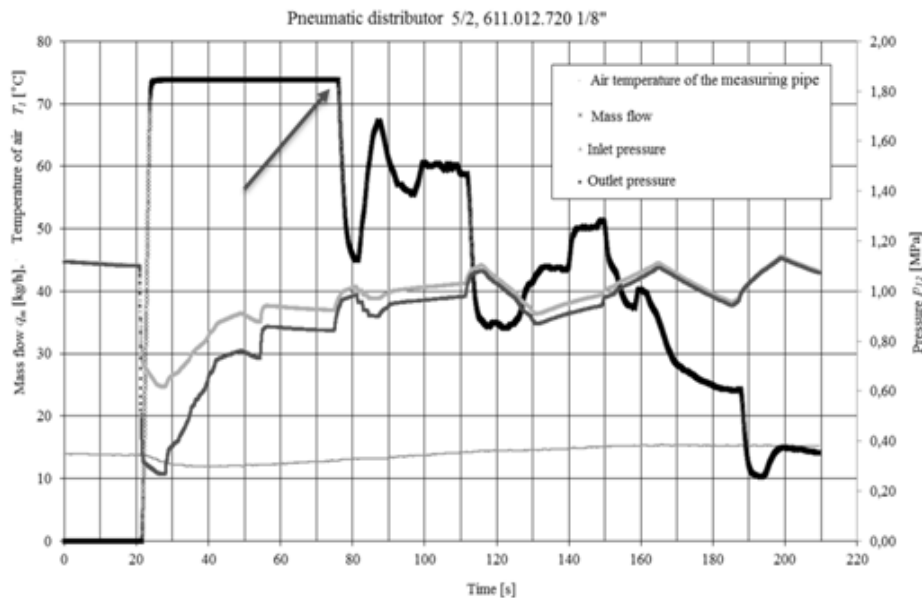
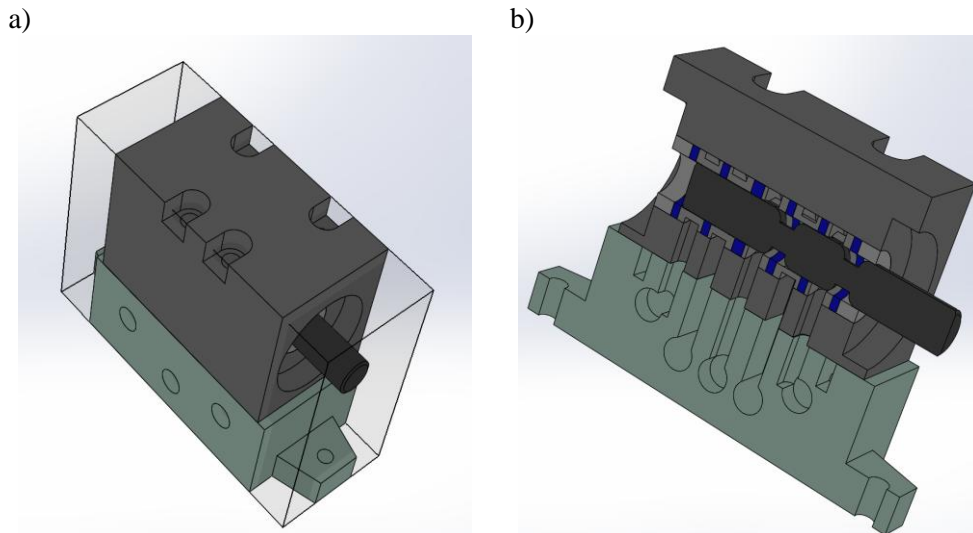


Fig. 5 Example of characteristics flow and pressure changes of inlet and outlet of distributor which was obtained of experimental investigations [12]

In example (Fig. 5) of characteristics flow and pressure changes is indicated a „throttling point”, in which „throttling” (pos. 12, Fig. 2) caused reduced mass flow. According relationship (Fig. 4), this is a transition point of critical area (A) to subcritical (B) area. The practical importance has a subcritical area and so should be designed pneumatic systems. Air temperature in measure pipe (pos. 8, Fig. 1) is recorded during investigations and have been presented in figure 5. The value of air temperature have been used as input data for simulation research.

3. Simulation research

The major challenge of CFD simulation of five ways, two positions pneumatic distributor have been verification of experimental and simulation results, such as: mass flow q_m with a difference pressure p_1 (inlet) and pressure p_2 (outlet) of distributor [12]. For this purpose, I needed create solid model of pneumatic distributor OBREiUP 611.012.720 1/8” (Fig. 6) and defined boundary conditions. Simulation have been conducted for one position of slider of distributor. Simulation have been conducted by SolidWorks Flow Simulation and used references [9÷11].



*Fig. 6 Solid model distributor OBREiUP 611.012.720 1/8:
a) view, b) cross-section*

In the first stage of the research, I conducted a simulation for the following boundary conditions: inlet pressure $p_1 = 0,72$ MPa, outlet $p_2 = 0,30$ MPa, temperature of air $T = 12,0^\circ\text{C}$. Vector distribution of pressure have been presented (Fig. 7). This picture presented the changing pressure of air in every cross-section of distributor for defined boundary conditions. Increasing value of pressure have been observed for control edge of slider. This is area of minimum velocity of air. Decreasing of value of pressure and increasing velocity of air have been observed in area of increase cross sectional which was presented in vector distribution of velocity (Fig. 8). Maximal velocity of air in the maximal cross-section surface for these boundary conditions is 280 m/s. This is much lower to compared with sound velocity of air. This may indicate that the critical flow is not reached. Sudden increasing of surface cross-section causes decreasing value of air temperature (18 to 7°C) as have been shown in figure 9. This is of stacking area of air pressure. Local changes of value of temperature have been observed in location of flow changes direction. This is area of decrease of velocity of air (to value 80 m/s), next the flow is growing (cools down and decompressed) to area of lower pressure.

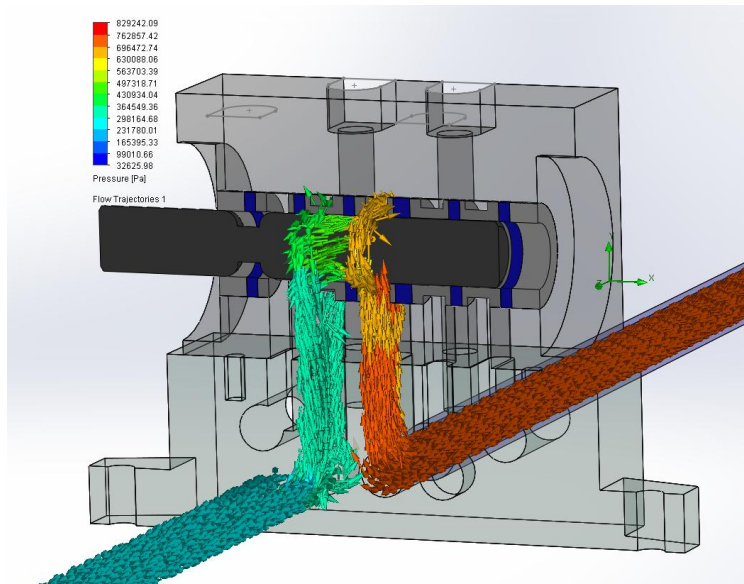


Fig. 7 Vector distributional of pressure of air in distributor OBREiUP 611.012.720 1/8 for the following boundary conditions: inlet pressure $p_1 = 0,72$ MPa, outlet $p_2 = 0,30$ MPa, temperature of air $T = 12,0^\circ\text{C}$

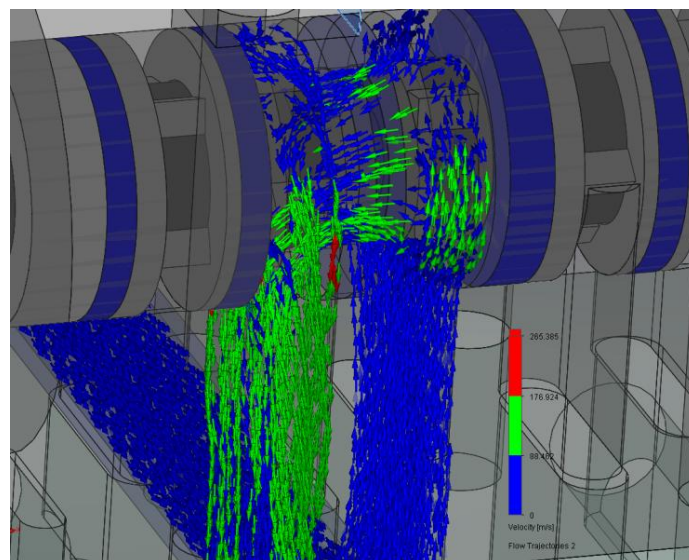


Fig. 8 Local distributional of velocity of air in distributor OBREiUP 611.012.720 1/8 for the following boundary conditions: inlet pressure $p_1 = 0,72$ MPa, outlet $p_2 = 0,30$ MPa, temperature of air $T = 12,0^\circ\text{C}$

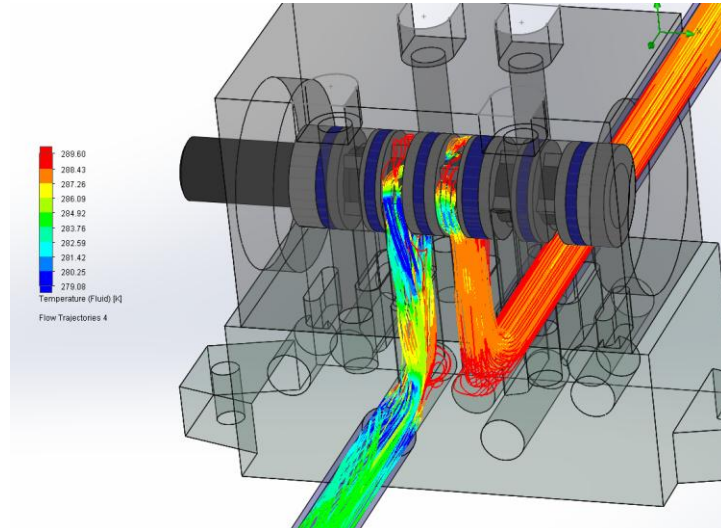


Fig. 9 Distributional of temperature of air in distributor OBREiUP 611.012.720 1/8 for the following boundary conditions: inlet pressure $p_1 = 0,72$ MPa, outlet $p_2 = 0,30$ MPa, temperature of air $T = 12,0^\circ\text{C}$

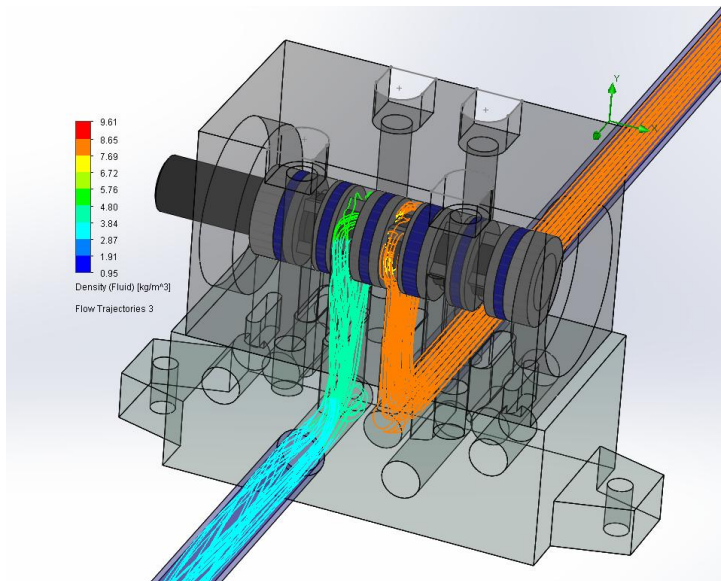


Fig. 10 Distributional of density of air in distributor OBREiUP 611.012.720 1/8 for the following boundary conditions: inlet pressure $p_1 = 0,72$ MPa, outlet $p_2 = 0,30$ MPa, temperature of air $T = 12,0^\circ\text{C}$

In the range of research have been included changing of density of air in the distributor.

The value of density in the stacking of air pressure area is 9 kg/m^3 (value of air pressure: $0,8 \text{ MPa}$, temperature 18°C). Consequently, the results obtained in this simulation has been illustrate decrease density if the cross-section surface increased. The mass flow which obtained during of experimental investigations and during of simulation differed for the values.

Mass flow of air which measured during of the experimental research is $73,83 \text{ kg/h}$, while the value obtained for the simulation is $88,52 \text{ kg/h}$ ($0,020459 \text{ kg/s}$). The value of difference between experimental and simulation results are 20% . The results of simulation for define boundary conditions did not shown sounds velocity. In the second stage of the research, I conducted a simulation for the following boundary conditions: inlet mass flow $q_m = 73,8 \text{ kg/h}$, outlet $p_2 = 0,30 \text{ MPa}$, temperature of air $T = 12,0^\circ\text{C}$.

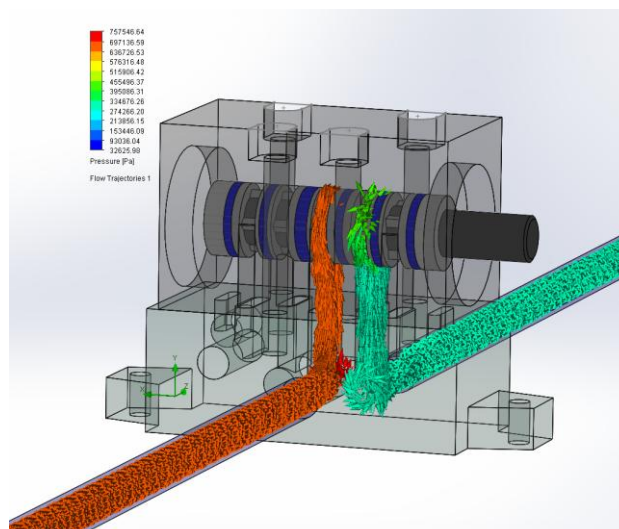


Fig. 11 Vector distributional of pressure of air in distributor OBREiUP 611.012.720 1/8 for the following boundary conditions: inlet mass flow $q_m = 73,8 \text{ kg/h}$, outlet $p_2 = 0,30 \text{ MPa}$, temperature of air $T = 12,0^\circ\text{C}$

The interpretation of pressure and velocity is analogical as for previous set of boundary conditions. The results of experimental and simulation values are slightly different.

The experimental value of inlet pressure for mass flow $73,83 \text{ kg/h}$ is $0,72 \text{ MPa}$. The value of inlet pressure of simulation is $0,75 \text{ MPa}$. The different of pressure value of experimental and simulation is 5% . The results of simulation for define boundary conditions did not shown sounds velocity.

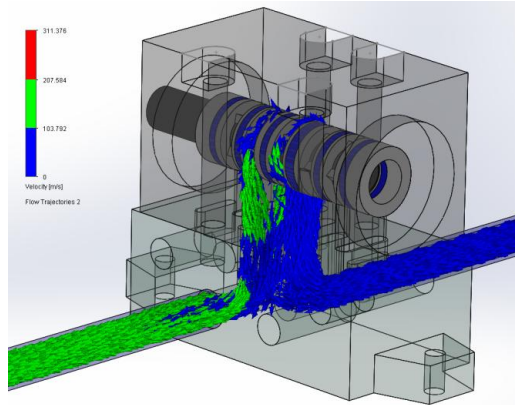


Fig. 12 Vector distribution of velocity of air in distributor OBREiUP 611.012.720 1/8 for the following boundary conditions: inlet mass flow $q_m = 73,8$ kg/h, outlet $p_2 = 0,30$ MPa, temperature of air $T = 12,0^\circ\text{C}$

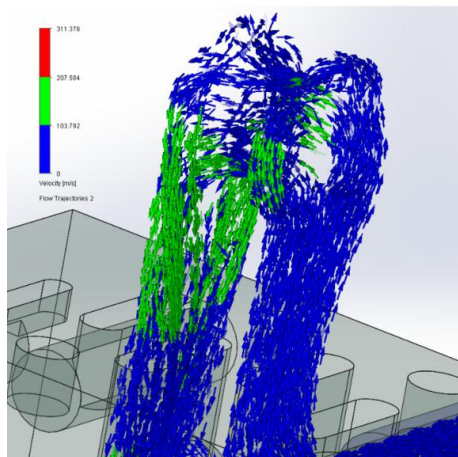


Fig. 13 Local distribution of velocity of air in distributor OBREiUP 611.012.720 1/8 for the following boundary conditions: inlet mass flow $q_m = 73,8$ kg/h, outlet $p_2 = 0,30$ MPa, temperature of air $T = 12,0^\circ\text{C}$

In the third of the research, I conducted a simulation for the following boundary conditions: inlet mass flow $q_m = 58,5$ kg/h, outlet pressure $p_2 = 0,92$ MPa, temperature of air $T = 12,0^\circ\text{C}$.

This research was conducted for verification the values for strong subcritical flow (for small difference inlet and outlet pressure). Results of experimental and simulation values are slightly different. The experimental value of inlet pressure p_1 for mass flow 58,5 kg/h is 0,98 MPa.

The simulation value of inlet pressure is 1,10 MPa (Fig. 14 i 15). The difference between of simulation and experimental values is about 12%. The results of simulation for define boundary conditions did not shown sounds velocity (Fig. 16).

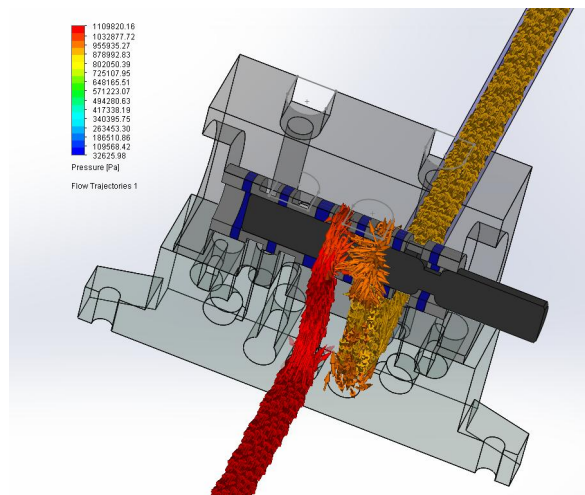


Fig. 14 Vector distributional of pressure of air in distributor OBREiUP 611.012.720 1/8 for the following boundary conditions: inlet mass flow $q_m = 58,5$ kg/h, outlet $p_2 = 0,92$ MPa, temperature of air $T = 12,0^\circ\text{C}$

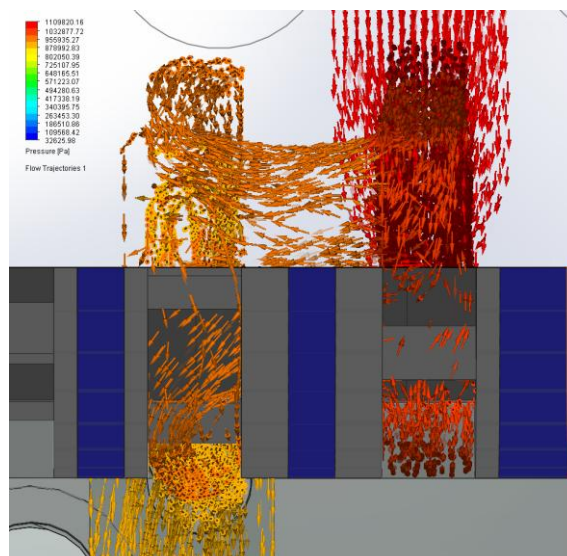


Fig. 15 Local distributional of pressure of air in distributor OBREiUP 611.012.720 1/8 for the following boundary conditions: inlet mass flow $q_m = 58,5$ kg/h, outlet $p_2 = 0,92$ MPa, temperature of air $T = 12,0^\circ\text{C}$

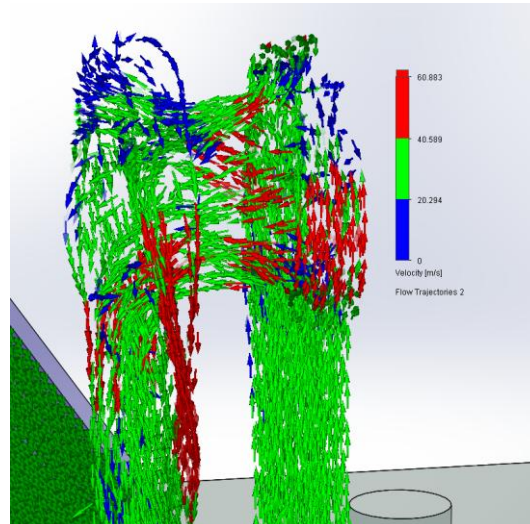


Fig. 16 Local distribution of velocity of air in distributor OBREiUP 611.012.720 1/8 for the following boundary conditions: inlet mass flow $q_m = 58,5$ kg/h, outlet $p_2 = 0,92$ MPa, temperature of air $T = 12,0^\circ\text{C}$

4. Summary

The values obtained during experimental and simulation investigations differ in range 5÷20%. The biggest difference of values (20%) obtained for strongly subcritical flow, for small pressure ratio p_2/p_1 (0,938). Much smaller difference (about 5%) obtained for critical flow for pressure ratio p_2/p_1 is about 0,4. For any variant of boundary conditions was not obtained local velocities of sound (about 340 m/s). The maximal value of velocities of air flow obtained in simulation has been about 280 m/s. The differences of values for experimental and simulation investigations are much slightly. It can also be used simulation methods for modification process of standard pneumatic components for special application. Simulation investigations make it possible to observe the flow values in every cross-section elements. It is very important for a process of modification of standard pneumatic component. The flow characteristics of pneumatic components are necessary in design process of special pneumatic systems (as with the UAV launcher). Modification of standard pneumatic component is realized in the stage of change of geometry of numerical solid model. Simulation investigations are moving for the next version of numerical solid model to meet the desired result. The next step of investigations is modification pneumatic component in accordance with the obtained numerical solid model.

The results obtained of simulation investigations must be verified with using experimental methods.

5. References

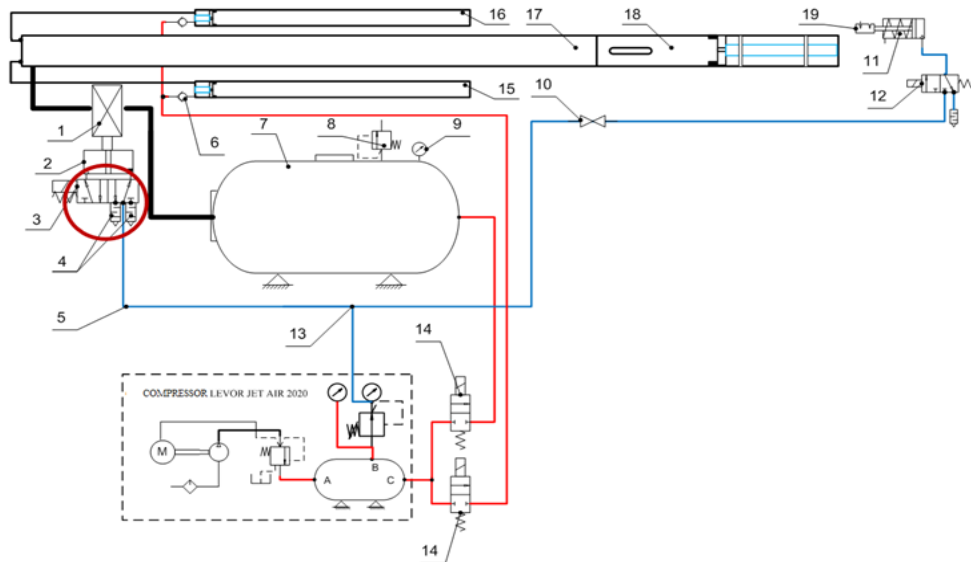
- [1] Jastrzębski G., Józko M., Szczepaniak P., Ułanowicz L.: *Przegląd i kryteria doboru wyrzutni BSP (UAV)*, ML – XVII, PTMTS, s. 145 – 154, Warszawa 2016.
- [2] Jastrzębski G., *Impact of opening time of the take-off pneumatic launcher main valve on take-off pressure losses*, Journal of KONES 2016 Vol. 23 No 4 s. 175-182.
- [3] Iwaszko J.: *Opory przepływu powietrza przez elementy pneumatyczne*, Prace naukowe Politechniki Warszawskiej, z. 177, Mechanika 1999.
- [4] Kamiński Z.: *Metody określania właściwości przepływowych elementów pneumatycznych*, Hydraulika i Pneumatyka, 5/2007.
- [5] Gerc E. W.: *Napędy pneumatyczne teoria i obliczenia*, WNT Warszawa 1973.
- [6] Norma PN-92 M-73763: *Napędy i sterowania pneumatyczne, Elementy pneumatyczne, Wyznaczanie parametrów przepływowych*.
- [7] Jastrzębski G., Czechowicz B.: *Wyrzutnia startowa ZOCP-JET2 Instrukcja Użytkowania*, ITWL 2015.
- [8] Teodorczyk A.: *Termodynamika techniczna*, WSiP, Warszawa 1999.
- [9] SolidWorks: *Tutorial SolidWorks Flow Simulation*, 2014.
- [10] SolidWorks: *Solving engineering tasks SolidWorks Flow Simulation*, 2014.
- [11] SolidWorks: *Technical reference SolidWorks Flow Simulation*, 2014.
- [12] Praca zbiorowa ITWL nr 8801/50: *Sprawozdanie nr 1S/36/2016. Badanie hybrydowych mechanizmów spustowych wyrzutni pneumatycznych oraz ich wpływu na funkcjonalność tych wyrzutni*. Warszawa 2016.

BADANIA ELEMENTÓW STEROWANIA PNEUMATYCZNYCH WYRZUTNI STARTOWYCH BEZZAŁOGOWYCH STATKÓW POWIETRZNYCH (BSP)

1. Wstęp

Dynamiczny rozwój bezzałogowych statków powietrznych (BSP) wymusił budowę urządzeń wspomagających startowanie. Urządzenia te są popularnie nazywane wyrzutniami startowymi lub urządzeniami miotającymi. Zastosowanie wyrzutni startowych zwiększa możliwości operacyjne BSP i eliminuje konieczność wykorzystywania lotniska do wykonywania zadań. Jednym z obszarów działania Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych jest konstruowanie napędów i sterowań pneumatycznych, w aspekcie ich implementacji w wyrzutniach startowych. Zasada działania układu napędowego wyrzutni pneumatycznej wykorzystuje rozprężanie sprężonego powietrza magazynowanego w zbiorniku głównym. Po otwarciu zaworu głównego (poz. 1, rys. 1) następuje rozprężanie powietrza ze zbiornika głównego (poz. 7 rys. 1), co powoduje napęd tłoka w cylindrze startowym (poz. 17 rys. 1). Wyniki prowadzonych w ITWL badań i analiz pozwoliły stwierdzić, że szczególnie wpływ na osiągi wyrzutni startowej (w tym szczególnie dysponowanie energią użyteczną) mają opory pneumatyczne w elementach układu sterowania. Opory pneumatyczne w elementach sterujących wpływają znacznie na czas zadziałania układu, którego wartość determinuje dysypację energii pneumatycznej zgromadzonej w zbiorniku głównym [2]. W związku z tym jednym z kierunków badań układów pneumatycznych wyrzutni startowych jest określanie charakterystyk przepływowych elementów sterujących w aspekcie świadomego projektowania i ewentualnej poprawy tych charakterystyk poprzez modyfikację elementów. Szczególna uwaga w zakresie prowadzonych badań została zwrócona na elektropneumatyczny zawór rozdzielczy 5/2 (poz. 3 rys. 1), służący do sterowania siłownikiem wahadłowym (poz. 2, rys. 1). Rozdzielacz ten jest przedmiotem badań eksperymentalnych i symulacyjnych opisanym w niniejszej publikacji. Siłownik wahadłowy służy do otwierania głównego zaworu kulowego (poz. 1, rys. 1.), otwierającego przepływ sprężonego powietrza ze zbiornika głównego (poz. 7, rys.1) do cylindra startowego (poz. 17, rys.1) [1, 2, 7].

Kompletne badania układu pneumatycznego wyrzutni startowej wymagają określenia wartości czasu działania układu otwierania głównego zaworu i związanych z tym strat ciśnienia w zbiorniku. W miarę zwiększania się wartości czasu otwierania zaworu głównego dochodzi do straty energii pneumatycznej, która objawiają się obniżaniem ciśnienia w zasobniku energii pneumatycznej (zbiorniku) zanim dojdzie do wyzwolenia (startu wózka). Skutkuje to niepełnym wykorzystaniem energii ciśnienia sprężonego powietrza. Procesy te związane są bezpośrednio z oporami pneumatycznymi elementów sterujących w układzie zasilania pneumatycznego.



Rys. 1 Schemat instalacji pneumatycznej wyrzutni startowej: 1 – główny zawór kulowy, 2 – siłownik wahadłowy, 3 – zawór elektropneumatyczny 5/2, 4 – tłumiki hałasu, 5 – linia zasilania układu sterującego, 6 – zawór jednokierunkowy, 7 – zbiornik główny sprężonego powietrza, 8 – zawór bezpieczeństwa, 9 – manometr, 10 – złączka, 11 – siłownik pneumatyczny, 12 – zawór elektropneumatyczny 3/2, 13 – trójnik, 14 – zawór elektropneumatyczny 2/2, 15 i 16 – cylindry hamujące, 17 – cylinder startowy, 18 – cylinder startowy z dobiegiem, 19 – zamek wózka [2]

Do określenia właściwości przepływowych oporowego elementu pneumatycznego niezbędna jest znajomość jego charakterystyki przepływowej, czyli zależności strumienia masy bądź strumienia objętości gazu przepływającego przez jego kanały, od czynników wywołujących ten przepływ.

Można wyróżnić trzy typy modeli charakterystyk przepływowych oporowych elementów pneumatycznych [12]:

- I. Układy równań różniczkowych lub całkowych, zbudowanych z wykorzystaniem podstawowych zasad mechaniki płynów ściśliwych, w tym różnych postaci równań Naviera-Stokesa. Równania te rozwiązywane są numerycznie dla określonych warunków początkowych oraz brzegowych – numeryczna mechanika płynów CFD (ang. *Computational Fluid Dynamics*).
- II. Modele przepływowe zwykłe i względne. Modele te zbudowane są z wykorzystaniem zależności wiążących spadek ciśnienia w elemencie oporowym, ze strumieniem objętościowym przez niego przepływającym, bądź przepływem nominalnym. Charakterystyki prezentuje się w postaci graficznej [4].
- III. Modele współczynników przepływu. Modele te zbudowane są z wykorzystaniem nieliniowych funkcji ciśnienia i temperatury na wlocie do elementu pneumatycznego oraz ciśnienia na jego wylocie (bądź w przestrzeni do której następuje wypływ). Parametry takiej funkcji nazywane są współczynnikami przepływu, a ich wartości wyznaczane są doświadczalnie [5].

Oczywistym kryterium oceny modelu strumienia masy bądź objętości gazu przepływającego przez element pneumatyczny jest zgodność wartości wyznaczanych, przy wykorzystaniu tego modelu z wartościami uzyskanymi eksperymentalnie. Pod tym względem modele z pierwszej grupy wydają się bezkonkurencyjne. Badania modelu z wykorzystaniem metod numerycznej mechaniki płynów wymagają jednak od badacza dużego doświadczenia praktycznego w tym zakresie, a uzyskiwane wyniki należy traktować z ostrożnością. Wyniki obliczeń z wykorzystaniem CFD praktycznie nie mają zastosowania przy integracji układu napędowego z gotowych elementów pneumatycznych. Zastosowanie metod CFD ograniczone jest do analizy dynamiki przepływu w trakcie kształtowania kanałów przepływowych nowo projektowanych elementów pneumatycznych lub badań mających na celu modyfikację ich właściwości przepływowych. Powszechnie przy projektowaniu kanałów przepływowych nowych urządzeń, wykorzystuje się modele z drugiej grupy oraz z trzeciej grupy. Wynika to z łatwości ich zastosowania i wystarczającej z technicznego punktu widzenia dokładności.

2. Badania eksperymentalne

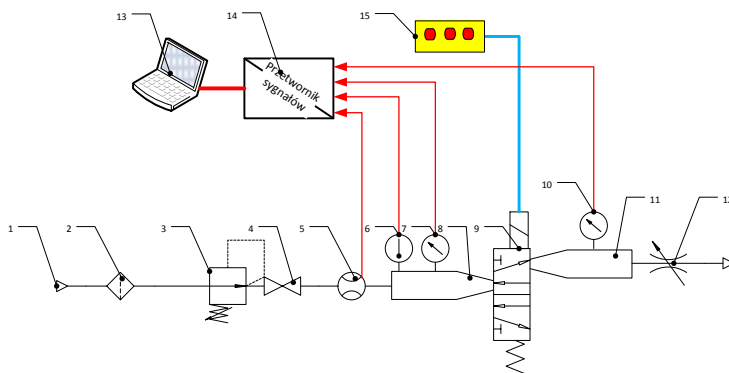
W układach pneumatycznych przekazywanie energii i sygnałów sterujących realizowane jest za pośrednictwem sprężonego gazu płynącego w układzie. Elementy składowe takiego układu mają właściwości oporowe, co ma wpływ na zmiany natężenia przepływu gazu przez jego kanały. Właściwości te opisane są parametrami przepływowymi, które wyznacza się doświadczalnie.

Obowiązujące obecnie normy PN-EN 60534 i EN 60534, ISO 6358 i PN-92/M-73763, ISO 6953, ISO/WD 6358 oraz ISO/DIS 6358, służą do wyznaczania zdefiniowanych współczynników przepływu i przewidują wykorzystanie metod bezpośrednich [12].

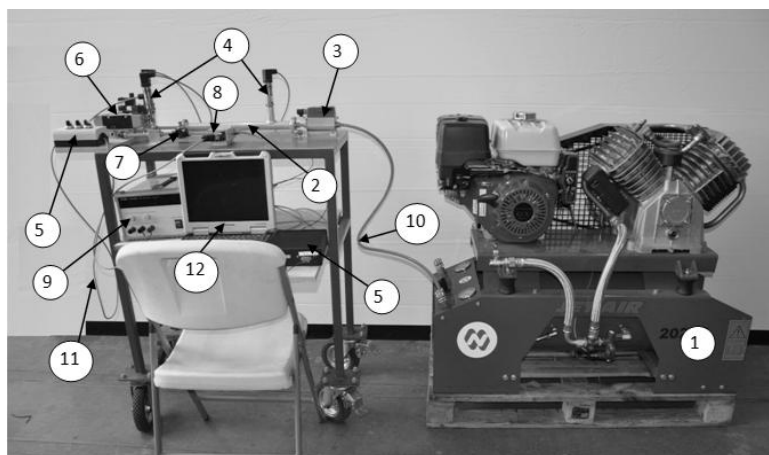
Schemat stanowiska do badania zaworów pneumatycznych pięciodrogowych dwupołożeniowych (5/2) i trójdrogowych dwupołożeniowych (3/2), został przedstawiony na rysunku 2. Projekt stanowiska badawczego elementów pneumatycznych został sporządzony zgodnie z wytycznymi przedstawionymi w normie PN-92/M-73763.

Przykład wykonania stanowiska badawczego do określania wartości parametrów przepływowych oporowych elementów pneumatycznych został przedstawiony na rysunku 3. Stanowisko to zostało zbudowane na podstawie wymagań normatywnych, natomiast jego konstrukcja jest oryginalnym osiągnięciem autorów [12].

*Research of pneumatic distributors for launcher of unmanned aerial vehicle...
Badania elementów sterowania pneumatycznych wyrzutni startowych...*



Rys. 2 Schemat stanowiska do badania zaworów pneumatycznych typ 5/2 i 3/2: 1 – źródło sprężonego powietrza, 2 – filtr, 3 – zawór redukcyjny, 4 – zawór odcinający, 5 – przepływomierz, 6 – czujnik temperatury, 7- czujnik ciśnienia, 8 – rura pomiarowa, 9 – badany zawór, 10 – czujnik ciśnienia, 11 – rura pomiarowa na wyjściu z elementu badanego, 12 – zawór dławiący, 13 – komputer, 14 – rejestrator sygnałów z czujników pomiarowych, 15 – pulpit sterujący pracą badanego zaworu [12]



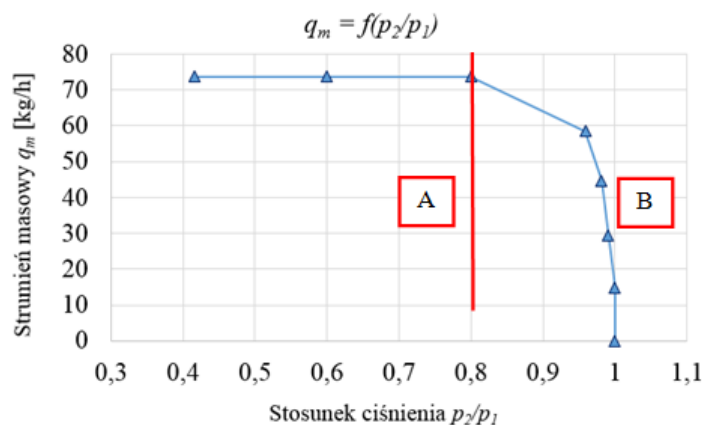
Rys. 3 Przykład wykonania stanowiska do badań parametrów przepływowych elementów pneumatycznych: 1 – sprężarka tłokowa wraz z wyposażeniem, 2 – rura pomiarowa, 3 – przepływomierz termoanemometryczny, 4 – czujniki ciśnienia i temperatury, 5 – pulpit sterujący, 6 – badany rozdzielacz, 7 – zawór dławiący regulowany, 8 – zawór odcinający, 9 – zasilacz laboratoryjny, 10 – przewody pneumatyczne, 11 – przewody sygnałowe i zasilające, 12 – komputer [12]

W tabeli 1 przedstawiono przykładowe wyniki badań dla zaworu o numerze katalogowym 611.012.720 (1/8”), produkcji polskiej (Ośrodek Badawczo Rozwojowy Elementów i Układów Pneumatyki Sp. z o.o.). Na rysunku 5 przedstawiono kompletną charakterystykę zmian strumienia masowego q_m , ciśnienia na wejściu do rozdzielacza p_1 , ciśnienia na wyjściu z rozdzielacza p_2 , temperatury powietrza T_1 w rurze pomiarowej przed rozdzielaczem 1/8”.

Tabela 1 Wyniki badań zaworu 5/2 [12]

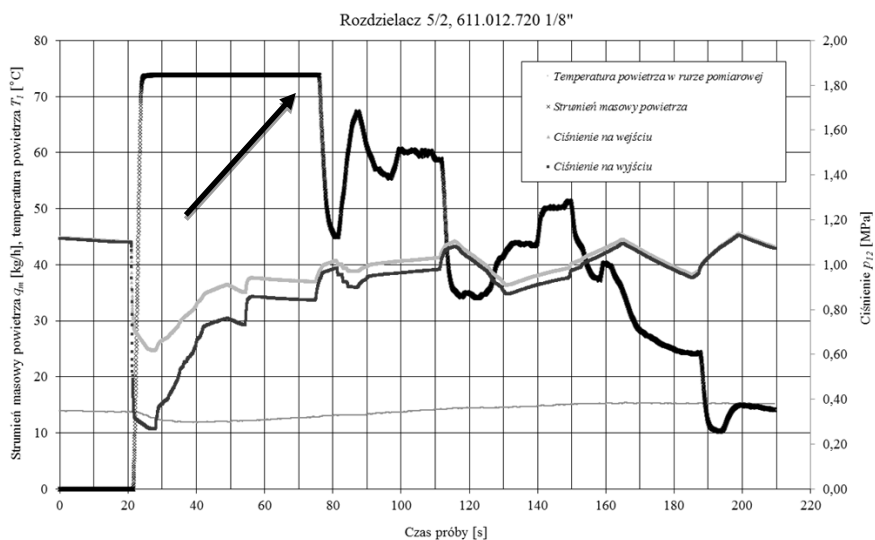
Numer katalogowy badanego zaworu: 611.012.720 1/8"				
Strumień wyjściowy % q_m^*	Strumień mas. powietrza q_m [kg/h]	Ciśnienie przed zaworem p_1 [MPa]	Ciśnienie za zaworem p_2 [MPa]	Temperatura powietrza T_1 [°C]
100	73,80	0,72	0,30	12
80	58,50	0,98	0,94	13
60	44,70	1,09	1,07	14
40	29,50	1,08	1,07	15
20	14,90	1,12	1,12	15

Według zapisów w normie PN-92/M-73763 zakres stosunku ciśnienia p_2/p_1 przy którym wartość strumienia masowego q_m nie ulega zmniejszeniu, jest obszarem wartości parametrów przepływu krytycznego (rys. 4). W obszarze w którym zakres stosunku ciśnienia p_2/p_1 jest na tyle duży, że wartość strumienia masowego q_m ulega zmniejszeniu jest obszarem przepływu podkrytycznego (rys. 4) [6]. Analogicznie obszar w którym zmniejszanie przekroju kanału wylotowego na wyjściu z badanego rozdzielacza (zwiększanie ciśnienia) nie powoduje zmiany wartości strumienia powinien być zakresem strumienia krytycznego. Brak możliwości uzyskania większego strumienia powietrza spowodowany był ograniczonymi osiągnięciami sprężarki zabudowanej na stanowisku badawczym.



Rys. 4 Zależność strumienia masowego q_m od stosunku ciśnienia p_2/p_1 , uzyskane w badaniach eksperymentalnych, A – obszar przepływu krytycznego, B – obszar przepływu podkrytycznego

Według prezentowanej charakterystyki (rys. 5) taka sytuacja ma miejsce w zakresie 22÷75s rejestracji. Zgodnie z informacją zawartą w normie symptomem osiągnięcia przepływu krytycznego jest pojawienie się w pewnym przekroju badanego elementu pneumatycznego lokalnej prędkości dźwięku [3, 6] przepływającego gazu, która dla powietrza o temperaturze 15°C, wynosi około 340,3 m/s [8].



Rys. 5 Przykładowa charakterystyka zmian strumienia masy q_m , ciśnienia na wejściu do rozdzielacza p_1 , ciśnienia na wyjściu z rozdzielacza p_2 , temperatury powietrza T_1 w rurze pomiarowej przed rozdzielaczem 1/8", uzyskana podczas badań eksperymentalnych [12]

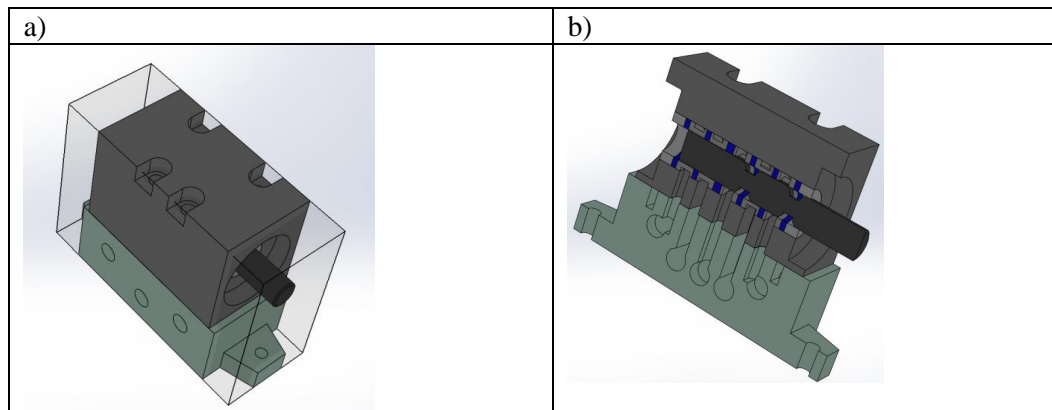
Na prezentowanej charakterystyce (rys. 5) zaznaczono punkt w którym dławienie przepływu za pomocą zaworu (poz. 12, rys. 2) spowodowało zmniejszenie strumienia masy. Według zależności (rys. 4) jest to punkt przejścia z obszaru przepływu krytycznego do podkrytycznego. Z praktycznego punktu widzenia należy tak projektować układy i dobierać parametry, żeby układ pracował w obszarze przepływu podkrytycznego.

W trakcie badań prowadzona była również rejestracja temperatury powietrza w rurze pomiarowej przed rozdzielaczem (poz. 8, rys. 1), a przebieg jej zmian został zaprezentowany na wykresie (rys. 5). Wartości temperatury zostały wykorzystane jako dane wejściowe do badań symulacyjnych.

3. Badania symulacyjne

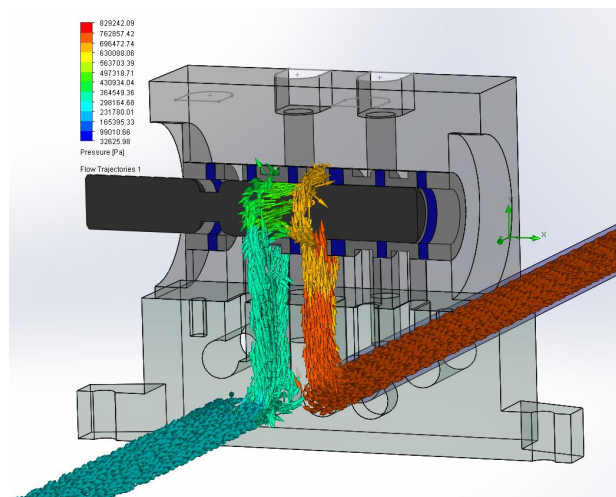
Głównym celem badań symulacyjnych rozdzielacza pneumatycznego, z wykorzystaniem metod CFD było potwierdzenie uzyskanych podczas badań eksperymentalnych wartości strumienia masy powietrza q_m , przy danej różnicy ciśnienia w kanale wejściowym p_1 i wyjściowym p_2 z rozdzielacza [12].

Badania symulacyjne wymagały stworzenia komputerowego modelu bryłowego badanego rozdzielacza pneumatycznego OBREiUP 611.012.720 1/8" (rys. 6), oraz zdefiniowania warunków brzegowych. Badania symulacyjne zostały przeprowadzone dla jednego położenia suwaka rozdzielczego w rozdzielaczu pneumatycznym pięciodrogowym, dwupołożeniowym. Do badań symulacyjnych wykorzystano pakiet aplikacji SolidWorks Flow Simulation i korzystano z poradników [9÷11].

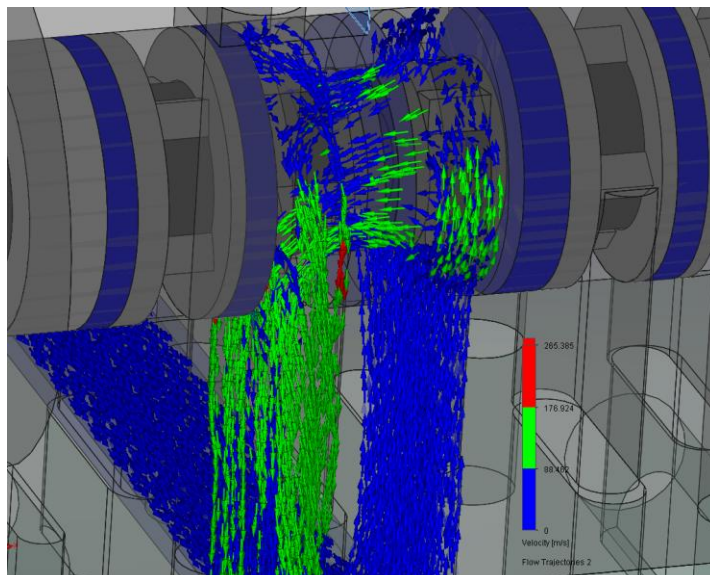


Rys. 6 Model bryłowy rozdzielacza OBREiUP 611.012.720 1/8:
a) widok, b) przekrój

W pierwszym etapie badań przeprowadzono symulację dla następujących warunków brzegowych: Ciśnienie na wejściu $p_1 = 0,72$ MPa, na wyjściu $p_2 = 0,30$ MPa, temperatura powietrza $T = 12,0^\circ\text{C}$. Rozkład ciśnienia zobrazony jest w postaci trajektorii przepływu (rys. 7) i przedstawia jak dla określonych warunków brzegowych zmienia się ciśnienie powietrza w przekroju rozdzielacza. Zwiększenie wartości ciśnienia zaobserwować można w obszarze krawędzi sterującej suwaka, a więc tam gdzie przekrój którym może przepływać strumień powietrza jest najmniejszy. Następnie w miarę zwiększania przekroju następuje spadek wartości ciśnienia i wzrost prędkości strumienia powietrza, co obrazuje rozkład prędkości w tym obszarze rozdzielacza (rys. 8).

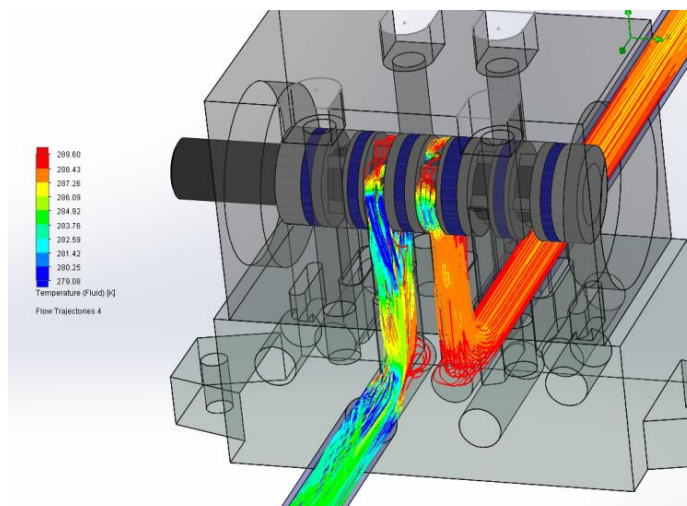


Rys. 7 Wektorowy rozkład ciśnienia w rozdzielaczu OBREiUP 611.012.720 1/8",
przy ciśnieniu na wejściu do rozdzielacza $p_1 = 0,72$ MPa, na wyjściu $p_2 = 0,30$
MPa, temperaturze powietrza na wejściu do rozdzielacza $T = 12,0^\circ\text{C}$



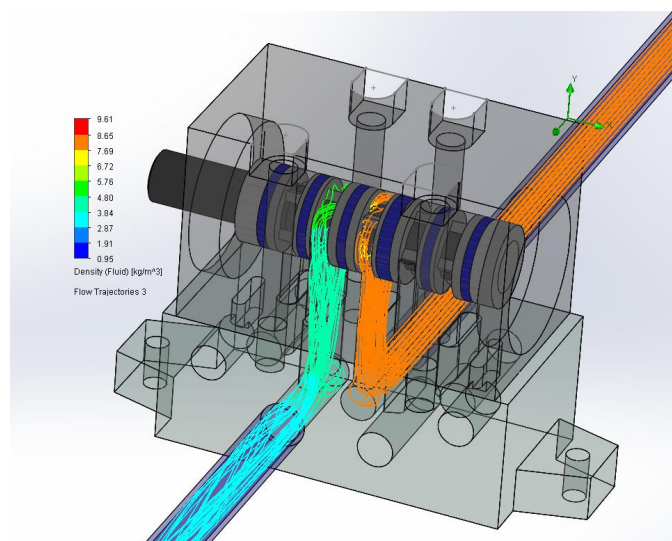
Rys. 8 Lokalny rozkład prędkości powietrza w rozdzielaczu OBREiUP 611.012.720 1/8", przy ciśnieniu na wejściu do rozdzielacza $p_1 = 0,72$ MPa, na wyjściu $p_2 = 0,30$ MPa, temperaturze powietrza na wejściu do rozdzielacza $T = 12,0^\circ\text{C}$

Maksymalna wartość uzyskana w obszarze nagłego zwiększania przekroju dla danych warunków brzegowych wynosi około 280 m/s, a więc znacznie poniżej prędkości dźwięku, co może świadczyć, że jednak przepływ krytyczny nie został osiągnięty.



Rys. 9 Rozkład temperatury powietrza w rozdzielaczu OBREiUP 611.012.720 1/8", przy ciśnieniu na wejściu do rozdzielacza $p_1 = 0,72$ MPa, na wyjściu $p_2 = 0,30$ MPa, temperaturze powietrza na wejściu do rozdzielacza $T = 12,0^\circ\text{C}$

W obszarze nagłego zwiększania prędkości, a więc nagłego zwiększenia przekroju przepływu zgodnie z oczekiwaniami, dochodzi lokalnego obniżenia temperatury powietrza do około 7°C z 18°C (rys. 9) – w miejscu spiętrzenia powietrza. Do lokalnego wzrostu temperatury powietrza dochodzi w miejscu zmiany kierunku przepływu w kanale wylotowym, w tym obszarze strumień powietrza zmniejsza swoją prędkość do około 80 m/s, by następnie się rozprężyć (ochłodzić i rozprężyć) w kierunku obszaru o mniejszym ciśnieniu.

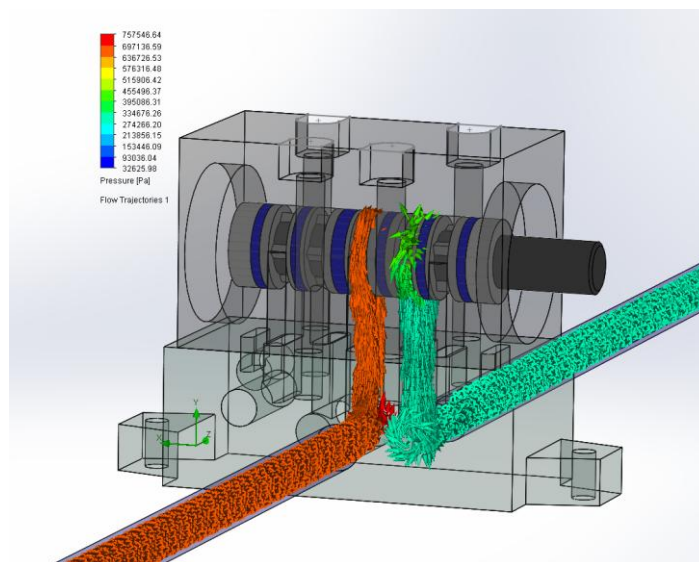


Rys. 10 Rozkład gęstości powietrza w rozdzielaczu OBREiUP 611.012.720 1/8", przy ciśnieniu na wejściu do rozdzielacza $p_1 = 0,72$ MPa, na wyjściu $p_2 = 0,30$ MPa, temperaturze powietrza na wejściu do rozdzielacza $T = 12,0^\circ\text{C}$

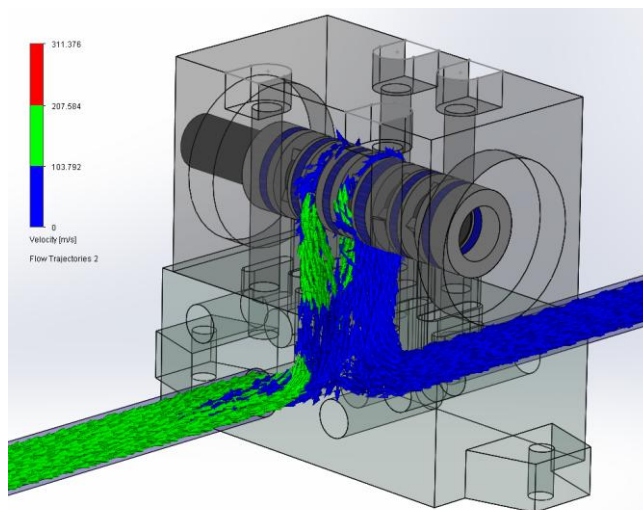
W ramach badań symulacyjnych wzięto pod uwagę również zmianę gęstości powietrza w rozdzielaczu pneumatycznym.

W obszarze spiętrzenia strumienia powietrza jego gęstość wynosiła około 9 kg/m^3 , przy ciśnieniu około 0,8 MPa i temperaturze 18°C . Z uzyskanego rozkładu gęstości zaobserwować można spadek gęstości zgodnie z oczekiwaniami, w miarę zwiększania przekroju kanału wylotowego z rozdzielacza. Wartości masowego strumienia powietrza uzyskane podczas badań eksperymentalnych oraz badań symulacyjnych różnią się. Zmierzona podczas badań eksperymentalnych wartość masowego strumienia powietrza wynosi 73,83 kg/h, natomiast dla zadanej różnicy ciśnienia z badań symulacyjnych uzyskano wartość strumienia masowego 0,020459 kg/s, co daje wartość 88,52 kg/h. Uzyskana rozbieżność pomiędzy uzyskanymi strumieniami metodami doświadczalnymi i symulacyjnymi wynosi około 20%. Dla zadanych warunków brzegowych nie uzyskano lokalnych prędkości dźwięku.

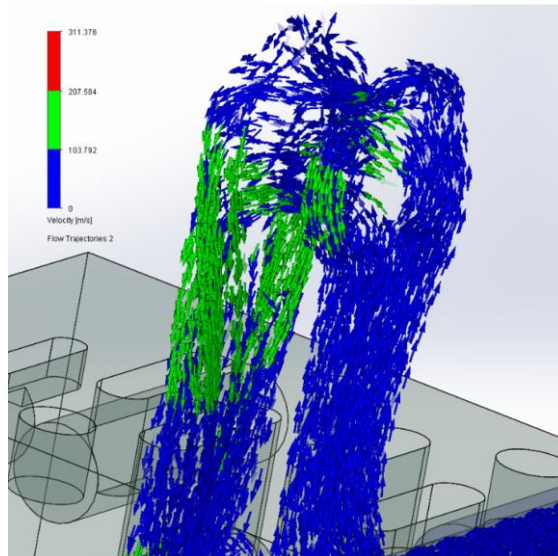
W drugim etapie badań przeprowadzono symulację dla następujących warunków brzegowych: strumień masowy na wejściu $q_m = 73,8$ kg/h, ciśnienie na wyjściu $p_2 = 0,30$ MPa, temperatura powietrza $T = 12,0^\circ\text{C}$.



Rys. 11 Wektorowy rozkład ciśnienia w rozdzielaczu OBREiUP 611.012.720 1/8", przy strumieniu masowym $q_m = 73,8$ kg/h na wejściu do rozdzielacza, ciśnieniu na wyjściu $p_2 = 0,30$ MPa, temperaturze powietrza na wejściu do rozdzielacza $T = 12,0^\circ\text{C}$



Rys. 12 Wektorowy rozkład prędkości powietrza w rozdzielaczu OBREiUP 611.012.720 1/8", przy strumieniu masowym $q_m = 73,8$ kg/h na wejściu do rozdzielacza, ciśnieniu na wyjściu $p_2 = 0,30$ MPa, temperaturze powietrza na wejściu do rozdzielacza $T = 12,0^\circ\text{C}$



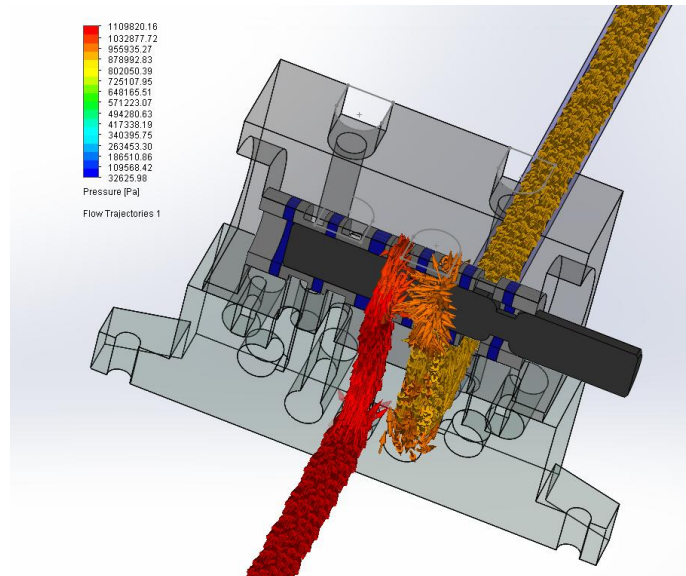
Rys. 13 Lokalny rozkład prędkości powietrza w rozdzielaczu OBREiUP 611.012.720 1/8", przy strumieniu masowym $q_m = 73,8$ kg/h na wejściu do rozdzielacza, ciśnieniu na wyjściu $p_2 = 0,30$ MPa, temperaturze powietrza na wejściu do rozdzielacza $T = 12,0^\circ\text{C}$

Interpretacja poszczególnych rozkładów ciśnienia, prędkości powietrza jest analogicznie jak dla poprzedniego wariantu warunków brzegowych.

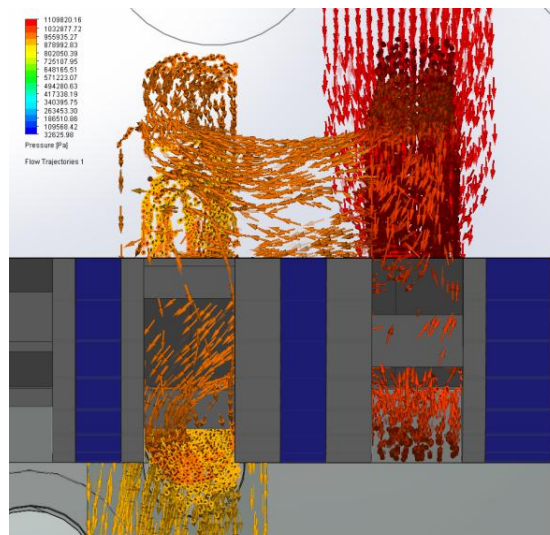
Uzyskane podczas badań eksperymentalnych oraz badań symulacyjnych różnice ciśnienia na wejściu i wyjściu z rozdzielacza różnią się nieznacznie. Zmierzona podczas badań eksperymentalnych wartość ciśnienia na wejściu do rozdzielacza, dla masowego strumienia powietrza o wartości 73,83 kg/h, wynosi 0,72 MPa. W wyniku badań symulacyjnych na wejściu do rozdzielacza uzyskano wartość 0,75 MPa. Uzyskana rozbieżność pomiędzy uzyskanymi wartościami ciśnienia metodami doświadczalnymi i symulacyjnymi wynosi około 5%. Dla zadanych warunków brzegowych nie uzyskano lokalnych prędkości dźwięku.

W trzecim etapie badań przeprowadzono symulację dla następujących warunków brzegowych. Strumień masowy na wejściu $q_m = 58,5$ kg/h, ciśnienie na wyjściu $p_2 = 0,92$ MPa, temperatura powietrza $T = 12,0^\circ\text{C}$. Badanie to zostało przeprowadzone w celu weryfikacji wartości dla przepływu mocno podkrytycznego (przy małej różnicy ciśnienia na wyjściu i wyjściu z rozdzielacza). Uzyskane podczas badań eksperymentalnych oraz badań symulacyjnych wartości ciśnienia na wejściu i wyjściu z rozdzielacza różnią się nieznacznie. Zmierzona podczas badań eksperymentalnych wartość ciśnienia na wejściu do rozdzielacza, dla masowego strumienia powietrza o wartości 58,5 kg/h, wynosi $p_1 = 0,98$ MPa. W wyniku badań symulacyjnych na wejściu do rozdzielacza uzyskano wartość 1,10 MPa (rys. 14 i 15).

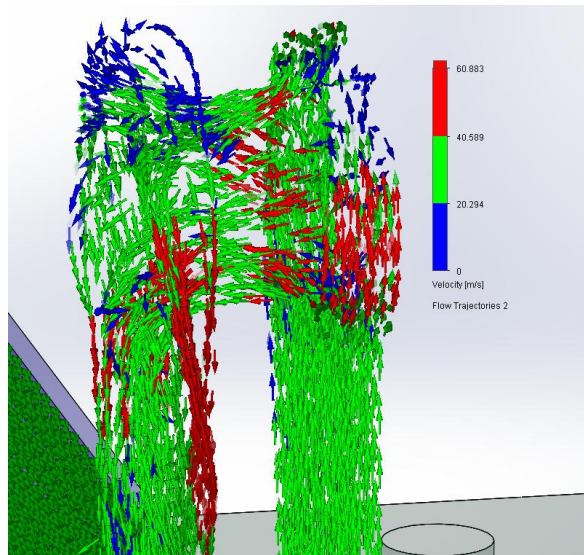
Uzyskana rozbieżność pomiędzy uzyskanymi wartościami ciśnienia metodami doświadczalnymi i symulacyjnymi wynosi około 12%. Dla zadanych warunków brzegowych nie uzyskano lokalnych prędkości dźwięku (rys. 16).



Rys. 14 Wektorowy rozkład ciśnienia w rozdzielaczu OBREiUP 611.012.720 1/8", przy strumieniu masowym $q_m = 58,5$ kg/h na wejściu do rozdzielacza, ciśnieniu na wyjściu $p_2 = 0,92$ MPa, temperaturze powietrza na wejściu do rozdzielacza $T = 12,0^\circ\text{C}$



Rys. 15 Lokalny rozkład ciśnienia w rozdzielaczu OBREiUP 611.012.720 1/8", przy strumieniu masowym $q_m = 58,5$ kg/h na wejściu do rozdzielacza, ciśnieniu na wyjściu $p_2 = 0,92$ MPa, temperaturze powietrza na wejściu do rozdzielacza $T = 12,0^\circ\text{C}$



Rys. 16 Lokalny rozkład prędkości powietrza w rozdzielaczu OBREiUP 611.012.720 1/8", przy strumieniu masowym $q_m = 58,5$ kg/h na wejściu do rozdzielacza, ciśnieniu na wyjściu $p_2 = 0,92$ MPa, temperaturze powietrza na wejściu do rozdzielacza $T = 12,0^\circ\text{C}$

4. Podsumowanie

Uzyskane podczas badań eksperymentalnych i symulacyjnych wartości wyników różnią się w zakresie 5÷20%. Większe różnice wartości wyników (20%) uzyskano dla przepływów podkrytycznych, dla wartości stosunku ciśnienia p_2/p_1 na poziomie 0,938. Znacznie mniejsze różnice (około 5%) uzyskano dla przepływu krytycznego, gdzie stosunek ciśnienia p_2/p_1 wynosił około 0,4. Dla żadnego z wykonanych badań symulacyjnych nie udało się osiągnąć lokalnych prędkości dźwięku (ok. 340 m/s). Maksymalna uzyskana lokalna wartość prędkości strumienia powietrza wynosi około 280 m/s.

Różnice w uzyskiwanych wynikach metodami symulacyjnymi i doświadczalnymi są na tyle nieduże, że można stosować badania symulacyjne w procesie modyfikacji standardowych elementów pneumatycznych dla specjalnych zastosowań. Badania symulacyjne umożliwiają ponadto obserwację wartości parametrów przepływu w każdym elemencie przekroju badanego elementu, co jest szczególnie istotne w aspekcie modyfikacji tego elementu.

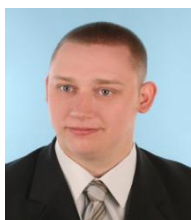
Charakterystyki przepływowe elementów pneumatycznych niezbędne są w procesie projektowania układów pneumatycznych specjalnego przeznaczenia, tak jak w przypadku instalacji pneumatycznej wyrzutni startowej. Modyfikowanie katalogowego elementu pneumatycznego odbywa się na etapie zmian w numerycznym modelu bryłowym.

Dla kolejnych wersji zmodyfikowanego elementu pneumatycznego przeprowadza się kolejne badania symulacyjne, aż do uzyskania pożądanego efektu, czyli spełnienia wymagań koniecznych do zastosowania w instalacji wyrzutni pneumatycznej.

Kolejnym krokiem jest modyfikacja rzeczywistego elementu pneumatycznego, zgodnie z uzyskanym finalnie modelem bryłowym i weryfikacja na stanowisku badawczym.

5. Literatura

- [1] Jastrzębski G., Jóźko M., Szczepaniak P., Ulanowicz L.: *Przegląd i kryteria doboru wyrzutni BSP (UAV)*, ML – XVII, PTMTS, s. 145 – 154, Warszawa 2016.
- [2] Jastrzębski G., *Impact of opening time of the take-off pneumatic launcher main valve on take-off pressure losses*, Journal of KONES 2016 Vol. 23 No 4 s. 175-182.
- [3] Iwaszko J.: *Opory przepływu powietrza przez elementy pneumatyczne*, Prace naukowe Politechniki Warszawskiej, z. 177, Mechanika 1999.
- [4] Kamiński Z.: *Metody określania właściwości przepływowych elementów pneumatycznych*, Hydraulika i Pneumatyka, 5/2007.
- [5] Gerc E. W.: *Napędy pneumatyczne teoria i obliczenia*, WNT Warszawa 1973.
- [6] Norma PN-92 M-73763: *Napędy i sterowania pneumatyczne, Elementy pneumatyczne, Wyznaczanie parametrów przepływowych*.
- [7] Jastrzębski G., Czechowicz B.: *Wyrzutnia startowa ZOCP-JET2 Instrukcja Użytkowania*, ITWL 2015.
- [8] Teodorczyk A.: *Termodynamika techniczna*, WSiP, Warszawa 1999.
- [9] SolidWorks: *Tutorial SolidWorks Flow Simulation*, 2014.
- [10] SolidWorks: *Solving engineering tasks SolidWorks Flow Simulation*, 2014.
- [11] SolidWorks: *Technical reference SolidWorks Flow Simulation*, 2014.
- [12] Praca zbiorowa ITWL nr 8801/50: *Sprawozdanie nr 1S/36/2016. Badanie hybrydowych mechanizmów spustowych wyrzutni pneumatycznych oraz ich wpływu na funkcjonalność tych wyrzutni*. Warszawa 2016.



Dr inż. Paweł Szczepaniak – absolwent Wydziału Mechanicznego Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie, dyscyplina naukowa: *Budowa i Eksploatacja Maszyn*. Specjalizuje się w zagadnieniach inżynierii eksploatacji oraz diagnostyki systemów płynowych techniki lotniczej. Pracuje na stanowisku adiunkta w Zakładzie Samolotów i Śmigłowców Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych w Warszawie.



Mgr inż. Michał Jóźko – Absolwent Wydziału Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej. Zajmuje się zagadnieniami związanymi z diagnostyką lotniczych instalacji hydraulicznych. Pracuje na stanowisku starszego specjalisty w Pracowni Badań i Konstrukcji Systemów Hydroenergetycznych Techniki Lotniczej, w Zakładzie Samolotów i Śmigłowców Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych w Warszawie.