CHARAKTERYSTYKI AERODYNAMICZNE SKOCZKA SPADOCHRONOWEGO

MACIEJ WALNIK, KATARZYNA STRZELECKA, ANDRZEJ GRONCZEWSKI

Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Wrocław

e-mail: maciekwalnik@gmail.com; katarzyna.strzelecka@pwr.edu.pl; andrzej.gronczewski@pwr.edu.pl

W artykule przedstawiono: sposób wyznaczenia współczynników siły oporu czołowego dla trzech skoczków o różnej budowie ciała przy wykorzystaniu pionowego tunelu aerodynamicznego; algorytm obliczania prędkości swobodnego opadania z uwzględnianiem zmian gęstości powietrza oraz fizykalnych parametrów skoczka; metodykę wyznaczania maksymalnej prędkości opadania (tzw. prędkość graniczną); zależność zmian prędkości lotu w funkcji czasu opadania dla skoczków o różnych pramateriach fizykalnych; procedurę badań symulacyjnych z wykorzystaniem oprogramowania CFD Ansys Fluent. Wyniki uzyskane podczas obliczeń i badań z wykorzystaniem programu CFD wykazały znaczną zbieżność.

1. Wstęp

Spadochroniarstwo to dziedzina sportu uprawiana przez amatorów, jak również przez profesjonalnych zawodników. Występuje kilkanaście dyscyplin sportu spadochronowego, a wśród nich takie jak:

- akrobacje,
- formacje w swobodnym spadaniu,
- freestyle,
- freeflying.

Wszystkie, wymienione powyżej dyscypliny charakteryzują się tym, że oceniane są dokonania zawodników w czasie swobodnego spadania. Jednym z ekstremalnych sportów jest *BASE jumping*, gdzie zasadniczą częścią skoku jest etap swobodnego spadania. Każdy skok spadochronowy rozpoczyna się krótszą lub dłuższą fazą swobodnego spadania. Znajomość techniki wykonywania skoku podbudowana wiedzą w zakresie aerodynamiki skoczka ma istotne znaczenie dla bezpieczeństwa, jak również sprzyja osiąganiu wysokich wyników w rywalizacji sportowej. Stąd też podjęto próbę wyznaczania charakterystyk aerodynamicznych skoczka spadochronowego w czasie swobodnego spadania.

Opuszczając statek powietrzny na wysokości 4000 metrów nad poziomem morza, skoczek spadochronowy zaczyna poruszać się w specyficzny sposób. Po rozpoczęciu ruchu skoczek gwałtownie przyspiesza, aby po kilkunastu sekundach osiągnąć prędkość maksymalną (graniczną). Następnie stopniowo zwalnia aż do końca trwania ruchu. Na osiąganą przez niego prędkość maksymalną, czas lotu czy zmiany przyspieszenia wypadkowego ma wpływ wiele czynników wynikających z budowy jego ciała, jak również zewnętrznych. Charakterystyka ruchu skoczka zależy m.in. od jego masy, powierzchni i orientacji ciała w przestrzeni, temperatury oraz gęstości powietrza, w którym się porusza.

2. Eksperymentalne wyznaczenie współczynnika oporu czołowego

Należy zauważyć, że podczas spadku swobodnego istnieje taka prędkość $v = V_{gr}$, dla której siła oporu zrównuje się co do wartości z ciężarem skoczka. Prędkość ta, to prędkość graniczna

skoczek, inaczej mówiąc, maksymalna prędkość, z którą może spadać skoczek o danych parametrach w powietrzu o danej gęstości

$$mg - C_x \frac{\rho V_{gr}^2 S}{2} = 0 \quad V_{gr} = \sqrt{\frac{2mg}{C_x \rho S}} \quad (2.1)$$

gdzie: m – masa skoczka, g – przyspieszenie ziemskie, V_{gr} – prędkość graniczna, S – powierzchnia odniesienia, ρ – gęstość powietrza, C_x – współczynnik aerodynamicznego oporu czołowego.

Współczynnik aerodynamicznego oporu czołowego C_x występujący w równaniu prędkości granicznej ciała spadającego swobodnie w atmosferze ziemskiej jest wielkością bezwymiarową, którą określa się eksperymentalnie. W rozpatrywanym przypadku na wartość C_x wpływ mają czynniki takie jak proporcje ciała skoczka czy przyjmowana podczas lotu pozycja. Dla pozycji neutralnej współczynnik jest wielkością stałą, charakterystyczną dla danego skoczka.

Celem osiągnięcia pozycji neutralnej skoczek wypycha biodra mocno w dół, tym samym zginając swoje ciało, dzięki czemu środek ciężkości znajduje się możliwie najniżej. Tułów i głowa znajdują się w jednej linii, przy czym głowa odchylona jest do tyłu, co poprawia stabilność pozycji. Nogi rozstawione są pod kątem 45° do 60° (na wysokości barków). Podudzia względem uda ustawione są pod kątem 110° do 120° , tak aby strugi napływającego powietrza napierały na kości piszczelowe i stopy. Ręce skoczka ustawione są symetrycznie względem siebie, przy zachowaniu kątów 90° między osią tułowia a ramieniem oraz między ramieniem a przedramieniem. Łokcie uniesione są lekko powyżej linii barków.

Celem poznania wartości współczynnika C_x dla przeciętnej osoby dorosłej, zbadano wartości prędkości granicznej trzech skoczków w pełnowymiarowym tunelu aerodynamicznym ISG 14.1200 produkcji Indoor Skydiving Germany Group. Pomiarów dokonywano w opisany niżej sposób:

- 1) pomiar powierzchni odniesienia (powierzchni rzutu ciała skoczka w pozycji neutralnej na płaszczyznę) na podstawie fotografii,
- 2) pomiar masy ciała skoczków,
- 3) pojedyncze wchodzenie skoczków do tunelu aerodynamicznego i przyjmowanie przez nich pozycji neutralnej,
- 4) dobór takiej prędkości przepływu powietrza w tunelu, dla której skoczek nie przemieszcza się w osi pionowej,
- 5) odczyt prędkości przepływu powietrza (prędkości granicznej skoczka) z aparatury pomiarowej tunelu,
- 6) pomiar parametrów powietrza – ciśnienia statycznego i temperatury,
- 7) wyznaczenie gęstości powietrza na podstawie pomiarów z kroku 6,
- 8) wyznaczenie współczynnika oporu aerodynamicznego skoczków zgodnie z równaniem

$$C_x = \frac{2Q}{\rho V_{gr}^2 S} = \frac{2mg}{\rho V_{gr}^2 S} \quad (2.2)$$

gdzie: Q – ciężar skoczka.

Tabela 1. Eksperymentalne wyznaczenie współczynnika oporu skoczków

Skoczek	S	m	v	ρ	C_x
1	0.666 m^2	72.9 kg	50.0 m/s	1.206 kg/m ³	0.712
2	0.562 m^2	60.0 kg	52.5 m/s		0.630
3	0.586 m^2	61.5 kg	49.2 m/s		0.705

Tunel aerodynamiczny jest korzystnym środowiskiem do wyznaczenia współczynnika C_x , ponieważ w przeciwieństwie do prawdziwego skoku spadochronowego gęstość powietrza w warunkach laboratoryjnych jest stała oraz możliwa do określenia w łatwy sposób.

3. Ruch obiektu spadającego swobodnie w atmosferze ziemskiej z uwzględnieniem zmiany gęstości powietrza wraz z wysokością

Aby otrzymać możliwie zbliżony do rzeczywistego matematyczny model ruchu skoczka spadochronowego, należy uwzględnić wpływ zmieniającej się wraz z wysokością gęstości powietrza. Siła oporu aerodynamicznego jest wprost proporcjonalna do gęstości powietrza, która z kolei nieliniowo zależy od wysokości. Wysokość z kolei w równaniu ruchu zależy od czasu. Ze względu na wysoki stopień uwikłania zmiennej gęstości powietrza w równaniu ruchu skoczka analityczne wyznaczenie takiego równania jest trudne i niepraktyczne.

Celem dokładnego opisanie ruchu, a zatem przebytej drogi, prędkości i wypadkowego przyspieszenia działającego na skoczka, posłużono się metodą numeryczną dzielącą całość ruchu na odcinki elementarne, po których w przybliżeniu ruch odbywa się ze stałą gęstością. Uproszczenie to można zastosować przy założeniu, że odcinki elementarne będą na tyle małe, że zmiana gęstości powietrza wewnątrz nich jest pomijalnie mała.

Opracowany algorytm przy pomocy arkusza kalkulacyjnego dla zestawu danych wejściowych pozwala z wybraną dokładnością opisać w sposób możliwie zbliżony do rzeczywistego ruch skoczka spadochronowego.

Zestaw danych wejściowych:

- h_0 – wysokość rozpoczęcia skoku, [m]
- m – masa skoczka, [kg]
- C_x – współczynnik oporu czołowego, [-]
- S – pole powierzchni charakterystycznej ciała, [m²]
- Δt – długość trwania elementarnego ruchu, [s]

Algorytm obliczeń

Tabela 2. Układ komórek algorytmu obliczeniowego

t	V_{gr}	ρ	h	v	a
t_0	V_{gr_0}	ρ_0	h_0	v_0	a_0
t_n	V_{gr_n}	ρ_n	h_n	v_n	a_n

Legenda oznaczeń:

- symbol – wartość wyznaczona podczas aktualnego kroku
- symbol – wartość wykorzystana do obliczeń podczas tego kroku
- symbol – wartość wyznaczona w poprzednich krokach

Tabela 3. Algorytm obliczeń elementarnych odcinków ruchu skoczka

1	Wprowadzić dane wejściowe $t_0 = 0, \quad h_0, a_0 = g$	<table><tr><td>t</td><td>V_{gr}</td><td>ρ</td><td>h</td><td>v</td><td>a</td></tr><tr><td>0</td><td></td><td></td><td>h_0</td><td></td><td>g</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>	t	V_{gr}	ρ	h	v	a	0			h_0		g						
t	V_{gr}	ρ	h	v	a															
0			h_0		g															
2	Dla zadanej wysokości rozpoczęcia skoku h_0 wyznaczyć gęstość powietrza na tej wysokości $\rho_0 = \rho(h_0) = \rho_{MAW} \left(1 - \frac{h_0}{44330}\right)^{4.256}$	<table><tr><td>t</td><td>V_{gr}</td><td>ρ</td><td>h</td><td>v</td><td>a</td></tr><tr><td>0</td><td></td><td>ρ_0</td><td>h_0</td><td></td><td>g</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>	t	V_{gr}	ρ	h	v	a	0		ρ_0	h_0		g						
t	V_{gr}	ρ	h	v	a															
0		ρ_0	h_0		g															

3	Wyznaczyć wartość prędkości granicznej skoczka na aktualnej wysokości $V_{gr_n} = V_{gr}(\rho_n, m, S, C_x) = \sqrt{\frac{2mg}{C_x \rho_n S}}$	<table><tr><td>t</td><td>V_{gr}</td><td>ρ</td><td>h</td><td>v</td><td>a</td></tr><tr><td>0</td><td>V_{gr_0}</td><td>ρ_0</td><td>h_0</td><td></td><td>g</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>	t	V_{gr}	ρ	h	v	a	0	V_{gr_0}	ρ_0	h_0		g												
t	V_{gr}	ρ	h	v	a																					
0	V_{gr_0}	ρ_0	h_0		g																					
4	Wyznaczyć wartość prędkości chwilowej skoczka $v_n = v(t_n, V_{gr_n}) = V_{gr_n} \tanh \frac{gt}{V_{gr_n}}$	<table><tr><td>t</td><td>V_{gr}</td><td>ρ</td><td>h</td><td>v</td><td>a</td></tr><tr><td>0</td><td>V_{gr_0}</td><td>ρ_0</td><td>h_0</td><td>v_0</td><td>g</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>	t	V_{gr}	ρ	h	v	a	0	V_{gr_0}	ρ_0	h_0	v_0	g												
t	V_{gr}	ρ	h	v	a																					
0	V_{gr_0}	ρ_0	h_0	v_0	g																					
5	Koniec odcinka elementarnego 0. W nowym wierszu wyznaczyć czas rozpoczęcia kolejnego elementarnego ruchu $t_n = t_{n-1} + \Delta t$	<table><tr><td>t</td><td>V_{gr}</td><td>ρ</td><td>h</td><td>v</td><td>a</td></tr><tr><td>0</td><td>V_{gr_0}</td><td>ρ_0</td><td>h_0</td><td>v_0</td><td>g</td></tr><tr><td>t_n</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>	t	V_{gr}	ρ	h	v	a	0	V_{gr_0}	ρ_0	h_0	v_0	g	t_n											
t	V_{gr}	ρ	h	v	a																					
0	V_{gr_0}	ρ_0	h_0	v_0	g																					
t_n																										
6	Wyznaczyć gęstość powietrza na aktualnej wysokości (przed odbyciem elementarnego ruchu) $\rho_n = \rho(h_{n-1}) = \rho_{MAW} \left(1 - \frac{h_{n-1}}{44330}\right)^{4.256}$	<table><tr><td>t</td><td>V_{gr}</td><td>ρ</td><td>h</td><td>v</td><td>a</td></tr><tr><td>0</td><td>V_{gr_0}</td><td>ρ_0</td><td>h_0</td><td>v_0</td><td>g</td></tr><tr><td>t_n</td><td></td><td>ρ_n</td><td></td><td></td><td></td></tr></table>	t	V_{gr}	ρ	h	v	a	0	V_{gr_0}	ρ_0	h_0	v_0	g	t_n		ρ_n									
t	V_{gr}	ρ	h	v	a																					
0	V_{gr_0}	ρ_0	h_0	v_0	g																					
t_n		ρ_n																								
7	Wyznaczyć wartość prędkości granicznej skoczka na aktualnej wysokości (wzór jak w kroku 3)	<table><tr><td>t</td><td>V_{gr}</td><td>ρ</td><td>h</td><td>v</td><td>a</td></tr><tr><td>0</td><td>V_{gr_0}</td><td>ρ_0</td><td>h_0</td><td>v_0</td><td>g</td></tr><tr><td>t_n</td><td>V_{gr_n}</td><td>ρ_n</td><td></td><td></td><td></td></tr></table>	t	V_{gr}	ρ	h	v	a	0	V_{gr_0}	ρ_0	h_0	v_0	g	t_n	V_{gr_n}	ρ_n									
t	V_{gr}	ρ	h	v	a																					
0	V_{gr_0}	ρ_0	h_0	v_0	g																					
t_n	V_{gr_n}	ρ_n																								
8	Wyznaczyć wartość prędkości chwilowej skoczka (wzór jak w kroku 4)	<table><tr><td>t</td><td>V_{gr}</td><td>ρ</td><td>h</td><td>v</td><td>a</td></tr><tr><td>0</td><td>V_{gr_0}</td><td>ρ_0</td><td>h_0</td><td>v_0</td><td>g</td></tr><tr><td>t_n</td><td>V_{gr_n}</td><td>ρ_n</td><td></td><td>v_n</td><td></td></tr></table>	t	V_{gr}	ρ	h	v	a	0	V_{gr_0}	ρ_0	h_0	v_0	g	t_n	V_{gr_n}	ρ_n		v_n							
t	V_{gr}	ρ	h	v	a																					
0	V_{gr_0}	ρ_0	h_0	v_0	g																					
t_n	V_{gr_n}	ρ_n		v_n																						
9	Wyznaczyć przyspieszenie wypadkowe działające na skoczka w danej chwili $a_n = a(v_n, v_{n-1}, t_n, t_{n-1}) = \frac{v_n - v_{n-1}}{t_n - t_{n-1}}$	<table><tr><td>t</td><td>V_{gr}</td><td>ρ</td><td>h</td><td>v</td><td>a</td></tr><tr><td>0</td><td>V_{gr_0}</td><td>ρ_0</td><td>h_0</td><td>v_0</td><td>g</td></tr><tr><td>t_n</td><td>V_{gr_n}</td><td>ρ_n</td><td></td><td>v_n</td><td>a_n</td></tr></table>	t	V_{gr}	ρ	h	v	a	0	V_{gr_0}	ρ_0	h_0	v_0	g	t_n	V_{gr_n}	ρ_n		v_n	a_n						
t	V_{gr}	ρ	h	v	a																					
0	V_{gr_0}	ρ_0	h_0	v_0	g																					
t_n	V_{gr_n}	ρ_n		v_n	a_n																					
10	Wyznaczyć wysokość na której przebywa skoczek po przebyciu elementarnego odcinka $h_n = h(t_n, t_{n-1}, h_{n-1}, v_n, a_n)$ $= h_{n-1} - \left[v_n(t_n - t_{n-1}) + \frac{1}{2} a_n(t_n - t_{n-1})^2 \right]$	<table><tr><td>t</td><td>V_{gr}</td><td>ρ</td><td>h</td><td>v</td><td>a</td></tr><tr><td>0</td><td>V_{gr_0}</td><td>ρ_0</td><td>h_0</td><td>v_0</td><td>g</td></tr><tr><td>t_n</td><td>V_{gr_n}</td><td>ρ_n</td><td>h_n</td><td>v_n</td><td>a_n</td></tr></table>	t	V_{gr}	ρ	h	v	a	0	V_{gr_0}	ρ_0	h_0	v_0	g	t_n	V_{gr_n}	ρ_n	h_n	v_n	a_n						
t	V_{gr}	ρ	h	v	a																					
0	V_{gr_0}	ρ_0	h_0	v_0	g																					
t_n	V_{gr_n}	ρ_n	h_n	v_n	a_n																					
11	Koniec odcinka elementarnego n . W nowym wierszu wyznaczyć czas rozpoczęcia kolejnego elementarnego ruchu (wzór jak w kroku 5)	<table><tr><td>t</td><td>V_{gr}</td><td>ρ</td><td>h</td><td>v</td><td>a</td></tr><tr><td>0</td><td>V_{gr_0}</td><td>ρ_0</td><td>h_0</td><td>v_0</td><td>g</td></tr><tr><td>t_{n-1}</td><td>$V_{gr_{n-1}}$</td><td>ρ_{n-1}</td><td>h_{n-1}</td><td>v_{n-1}</td><td>a_{n-1}</td></tr><tr><td>t_n</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>	t	V_{gr}	ρ	h	v	a	0	V_{gr_0}	ρ_0	h_0	v_0	g	t_{n-1}	$V_{gr_{n-1}}$	ρ_{n-1}	h_{n-1}	v_{n-1}	a_{n-1}	t_n					
t	V_{gr}	ρ	h	v	a																					
0	V_{gr_0}	ρ_0	h_0	v_0	g																					
t_{n-1}	$V_{gr_{n-1}}$	ρ_{n-1}	h_{n-1}	v_{n-1}	a_{n-1}																					
t_n																										
12	Jeśli $h_n > 0$, powtórzyć kroki 6-12. W przeciwnym wypadku: koniec algorytmu																									

Wygenerowany w ten sposób zestaw danych pozwala na wyznaczenie dokładnych charakterystyk zmian wszystkich obliczanych wielkości oraz na określenie wartości dodatkowych parametrów opisujących ten ruch, takich jak:

- V_{max} – prędkość maksymalna skoczka, punkt przegięcia funkcji prędkości od czasu,

- t_{skoku} – czas potrzebny na pokonanie drogi od h_0 do $h_n \approx 0$,
- t_{gr} – czas osiągnięcia prędkości granicznej.

4. Wpływ parametrów fizycznych skoczka na charakterystyki ruchu

4.1. Masa skoczka

Wykonano szereg symulacji dla różnych mas skoczka przy założeniu, że powierzchnia jego ciała (powierzchnia odniesienia) oraz współczynnik oporu aerodynamicznego są stałe i wynoszą: $C_x = 0,67$ (przyjęto na podstawie pomiarów eksperymentalnych, odpowiada dorosłemu człowiekowi o przeciętnej budowie ciała), $S = 0,7 \text{ m}^2$.

Rys. 1. Zależności czasu trwania lotu oraz czasu osiągnięcia 99% prędkości granicznej od masy skoczka

Linia ciągła na przedstawionym wyżej wykresie opisuje zależność czasu trwania lotu (od wyskoczenia na $h_0 = 4000 \text{ m}$ do $h = 0 \text{ m}$) od masy skoczka. Linia przerywana pokazuje czas potrzebny skoczkowi o danej masie na osiągnięcie 99% wartości prędkości granicznej.

Rys. 2. Zależność prędkości spadania od czasu dla różnych mas skoczka

Im mniejsza masa skoczka, tym bardziej wypłaszczona i mniej stroma jest krzywa opisująca zmianę prędkości lotu w czasie. Należy zauważyć, że do pewnego momentu ($\sim 80\%$ prędkości maksymalnej) prostoliniowe części krzywych dla wszystkich mas niemalże pokrywają się. Dzieje się tak, ponieważ siła oporu dla tego zakresu prędkości jest na tyle mała, że ruch przypomina ruch jednostajnie przyspieszony, w którym masa spadającego obiektu nie ma wpływu na prędkość jego spadania.

Rys. 3. Zależność prędkości maksymalnej osiągananej przez skoczka od jego masy

Zależność prędkości maksymalnej skoczka od jego masy, przedstawioną na wykresie na rys. 3, ma kształt wycinka odwróconej paraboli. Zależność ta jest związana z równaniem na prędkość graniczną $\sqrt{2mg/(C_x\rho S)} = V_{gr}$, skąd widać, że wartość prędkości granicznej zależy od pierwiastka masy skoczka.

4.2. Współczynnik oporu aerodynamicznego, powierzchnia ciała skoczka

Obie wielkości (C_x oraz S) występują w równaniu ruchu skoczka obok siebie jako czynniki mnożenia, a ich rozdzielanie i zmienianie pojedynczo nie ma fizycznego sensu (C_x wyznaczany jest dla konkretnej S). Celem zobrazowania zmian w charakterystykach ruchu spowodowanych zmianą współczynnika oporu bądź powierzchni ciała skoczka wykonano szereg symulacji dla różnych wartości iloczynu $C_x S$, przy założeniu, że masa skoczka jest stała i wynosi $m = 75$ kg.

Rys. 4. Zależność czasu trwania lotu oraz czasu osiągnięcia 99% prędkości granicznej od iloczynu współczynnika oporu i powierzchni ciała skoczka

Zależność pokazana na rys. 6 ma kształt paraboli z ramionami skierowanymi ku górze (odwrotnie niż w zależności od masy). Podobnie jak dla masy, równanie krzywej V_{max} jest związane z przebiegiem funkcji prędkości granicznej $\sqrt{2mg/(C_x S \rho)} = V_{gr}$, skąd widać, że wartość prędkości granicznej zależy od pierwiastka odwrotności iloczynu $C_x S$.

5. Symulacja ruchu skoczka w oprogramowaniu CFD

Korzystając z udostępnionego w domenie publicznej modelu sylwetki człowieka, ustawiono takie wartości kątów zgięcia stawów, aby sylwetka ciała odpowiadała pozycji neutralnej, przyjmowanej przez skoczków spadochronowych oraz siły na płaszczyźnie poziomej (prostopadłej do kierunku spadania) były jak najmniejsze – rozpatrujemy spadek pionowy bez prędkości horyzontalnej.

Rys. 5. Zależność prędkości spadania od czasu dla różnych wartości iloczynu współczynnika oporu i powierzchni ciała skoczka

Rys. 6. Zależność prędkości maksymalnej osiąganej przez skoczka od wartości iloczynu współczynnika oporu i powierzchni ciała skoczka

Rys. 7. Model skoczka w pozycji neutralnej z widocznymi wiązaniami stawów

5.1. Konfiguracja projektu w ANSYS Workbench

Przygotowany w odpowiedniej pozycji model skoczka zaimportowano do modułu DesignModeler programu ANSYS Workbench, a następnie utworzono wokół niego kanał, którym przepływać będzie płyn podczas symulacji. Kanał ten składa się z półkolistej części wlotowej (przed skoczkiem) oraz cylindrycznej części przepływowej wokół i za modelem. Średnica kanału (8 m) stanowi kilkakrotność najdłuższego wymiaru badanego modelu, dzięki czemu opływ przy granicy kanału nie wpłynie negatywnie na wyniki symulacji w obszarze modelu i w jego bezpośrednim sąsiedztwie.

W stworzonym w poprzednim kroku obszarze przepływu płynu wygenerowano siatkę obliczeniową. Przyjęto maksymalny rozmiar elementu siatki równy 1.3 m dla maksymalnego rozmiaru pojedynczego poligonu 0.8 m, Obszar bezpośredniego sąsiedztwa modelu wypełniono gęstszą siatką z zadaniem rozmiarem elementu równym 0.02 m, a powierzchnię modelu, stanowiącą granicę między płynem a ciałem stałym, pokryto sztywną siatką o rozmiarze elementu 0.01 m.

W ustawieniach symulacji Fluent wybrano model lepkości k-epsilon wykonalny (ang. *realizable k-epsilon viscous model*), jeden z najczęściej wykorzystywanych modeli obliczeniowych w numerycznej mechanice płynów. Skorzystano z opcji „non-equilibrium wall functions” dla obliczeń w sąsiedztwie granicy płynu. Wektor prędkości płynu w symulacji jest równoległy do osi X , zgodnie z przyjętym wcześniej układem odniesienia względem modelu skoczka.

5.2. Wyniki symulacji CFD

Przeprowadzono 55 symulacji (po 50 iteracji każda) opływu ciała skoczka dla parametrów wynikających z zastosowanego algorytmu obliczeniowego. Oprócz wartości siły oporu czołowego działającej na model skoczka, symulacja szczegółowo obrazuje zachowanie powietrza opływającego ciało.

Tabela 4. Porównanie wyników metody analitycznej i CFD

	Metoda analityczna	Metoda CFD
Czas skoku ($h_0 \rightarrow h_n = 0$)	66,5 s	65,5 s
Prędkość maksymalna V_{max}	67,81 m/s	68,93 m/s
Czas osiągnięcia V_{max}	18,0 s	16,5 s

Różnica między metodą analityczną a CFD jest bardzo niewielka. Oba sposoby obliczeń przyniosły jednakowe efekty.

Rys. 8. Zależność wysokości od czasu – metoda analityczna i CFD

Na rysunkach 11-14 przedstawiono wizualizacje ciśnienia powietrza przy powierzchni ciała skoczka oraz w płaszczyźnie równoległej do opływu, poprowadzonej w kierunku od głowy do kroczka.

Rys. 9. Zależność prędkości od czasu – metoda analityczna i CFD

Rys. 10. Zależność przyspieszenia wypadkowego od czasu, metoda analityczna i CFD

Rys. 11. Ciśnienie względne ($t = 1.0$ s), widok z boku

Rys. 12. Ciśnienie względne ($t = 1.0$ s), widok izometryczny

Rys. 13. Ciśnienie względne ($t = 16,5$ s), maksymalna prędkość spadania, widok z boku

Rys. 14. Ciśnienie względne ($t = 16,5$ s), maksymalna prędkość spadania, widok izometryczny

Uwaga. Wizualizacje na rys. 11 i 12 oraz 13 i 14 wykonano w innej skali ciśnień dla zachowania czytelności.

6. Podsumowanie

Dla każdego ciała poruszającego się względem otaczającego je płynu, wyznaczyć można wielkość charakterystyczną: współczynnik oporu czołowego. Znając go, można w prosty sposób, stosując pewne uproszczenia, opisać zachowanie skoczka w przestrzeni. Współczynnik wyznaczyć można eksperymentalnie, wykorzystując tunel aerodynamiczny, jak również obliczeniowo, przy pomocy oprogramowania CFD. W ramach pracy zastosowano obie wspomniane metody, porównując charakterystyki ruchu skoczka o znanym (założonym współczynniku) oraz te obliczone komputerowo.

Dzięki oprogramowaniu CFD, zakładając możliwość stworzenia trójwymiarowego modelu badanego człowieka, możliwe jest dokładne i nieobarczone znaczącym błędem wyznaczenie charakterystycznego dla niego współczynnika C_x . Znając wartość współczynnika, korzystając z zaprezentowanej w pracy metody, można w prosty sposób otrzymać wykresy wysokości, prędkości i przyspieszenia wypadkowego w funkcji czasu.

Projekt ten można potencjalnie rozwinąć w kierunku optymalizacji charakterystyk ruchu skoczka, poprzez zbadanie, w jaki sposób w zależności od ubranego kombinezonu zmienia się współczynnik oporu czołowego. Ponadto rozważania można rozszerzyć o siły wypadkowe działające w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku ruchu skoczka, co pozwoliłoby na wyznaczenie i opisanie całego toru lotu w przestrzeni trójwymiarowej.

Bibliografia

1. SKYDIVE OLSZTYN – *Skrypt skoczka spadochronowego*
<http://skydive.olsztyn.pl/pdf/Zasady%20skoku%20spadochronowego.pdf> [dostęp 10.06.2020]
2. YITANG DESIGN STUDIO – *Model ciała człowieka* [dostęp 10.06.2020]
<http://1t.qunheb.com/> [dostęp 06.01.2020]
3. COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS ONLINE – *Model obliczeniowy k-epsilon*
https://www.cfd-online.com/Wiki/K-epsilon_models [dostęp 06.01.2020]

Aerodynamic characteristics of a parachute jumper

The main goal of this paper is to calculate the factor of the force of aerodynamic resistance and to describe characteristics of the speed of falling for various altitudes, considering physical features of a man as well as flight altitude. In the article, the aerodynamic resistance of three jumpers of different body builds is calculated. The algorithm for calculating the speed of free falling with consideration of changes in air density and physical parameters of the jumper; the method of calculating the maximum speed of the free-fall (i.e. terminal velocity); the dependence of changes in the flight speed in falling time for jumpers of different physical parameters; the procedure of experimental simulation with the use of CFD Ansys Fluent software as well as the results of the said simulations; comparison of simulation results to those obtained by an analytical approach are addressed in the paper. The results obtained from simulations and calculations have proved to be largely similar.