

ANALIZA WPŁYWU WARUNKÓW ATMOSFERYCZNYCH NA OPÓR AERODYNAMICZNY AUTOBUSU MIEJSKIEGO

W niniejszym artykule przedstawiono analizę wpływu warunków atmosferycznych na poziom oporów aerodynamicznych autobusu miejskiego na przykładzie Mercedesa Conecto użytkowanego przez Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne w Lublinie. Warunki brzegowe do obliczeń opracowano na podstawie danych z Krajowego Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej oraz serwisów pogodowych.

WSTĘP

Charakterystyczną cechą klimatu Polski jest duża zmienność warunków atmosferycznych, której skutkiem jest zróżnicowanie przestrzenne pojawiania się i czasu trwania termicznych pór roku co w konsekwencji prowadzi do zmian zarówno temperatury powietrza, ciśnienia jak i wilgotności w ciągu całego roku. Zmiany te mają bezpośredni wpływ na gęstość powietrza, a tym samym na wartość oporu aerodynamicznego, działającego na poruszające się w nim obiekty. Celem niniejszej pracy jest wyznaczenie poziomu zmian wartości siły oporu działającej na model autobusu miejskiego w zależności od pory roku.

1. ZWIĄZEK PARAMETRÓW TERMODYNAMICZNYCH Z OPOREM AERODYNAMICZNYM

Opór aerodynamiczny definiowany jest jako siła przeciwdziałająca ruchowi, a jego wartość jest ściśle powiązana z bezwymiarowym współczynnikiem oporu c_x , gęstością powietrza ρ , powierzchnią odniesienia A oraz kwadratem względnej prędkości powietrza opływającego autobus V^2 . Równanie opisujące siłę oporu, zgodnie z [1,2] przyjmuje postać:

$$P_x = \frac{1}{2} A \rho V^2 c_x \quad (1)$$

Zgodnie z [x,y], w większości zagadnień powietrze można traktować jako gaz doskonały, zatem wykorzystując równanie stanu gazu doskonałego, gęstość powietrza można zapisać jako:

$$\rho = \frac{R_m T}{p} \quad (2)$$

gdzie: R_m – zastępcza stała gazowa uwzględniająca wilgotność powietrza, T – temperatura, p – ciśnienie. Wartość oporu aerodynamicznego działającego na poruszający się pojazd można więc zapisać w postaci:

$$P_x = \frac{1}{2} A \frac{R_m T}{p} V^2 c_x \quad (3)$$

Zastępcza stała gazowa mieszaniny gazów jaką jest powietrze zależy od udziałów poszczególnych składników i zgodnie z [3] może być zapisana wzorem:

$$R_m = \sum_{i=1}^n g_i R_i \quad (4)$$

gdzie: g_i – udział masowy i-tego składnika mieszaniny, R_i – indywidualna stała gazowa i-tego składnika mieszaniny. Zgodnie z [4] skład powietrza suchego jest stały, zmianom ulega jedynie zawartość wilgoci w powietrzu atmosferycznym. Zastępcza stała gazowa powietrza atmosferycznego zmienia się więc w zależności od zawartości pary wodnej. Zawartość wilgoci w powietrzu określa stosunek masy wody zawartej w powietrzu atmosferycznym do masy suchego powietrza:

$$X = \frac{m_{pH_2O}}{m_{pow}} \quad (5)$$

Znając zawartość wilgoci w powietrzu możliwe jest więc zgodnie z [3,4] określenie udziałów masowych pary wodnej g_{pH_2O} i powietrza suchego g_{pow} za pomocą zależności:

$$g_{pH_2O} = \frac{X}{1+X}, \quad g_{pow} = \frac{1}{1+X} \quad (6)$$

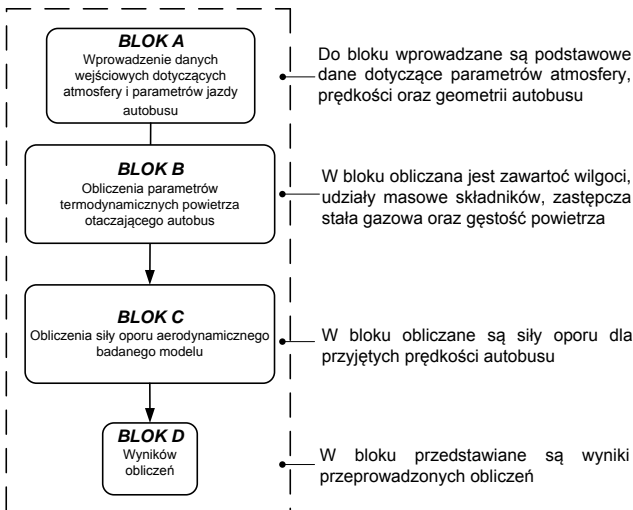
Biorąc pod uwagę udziały masowe pary wodnej i powietrza suchego, zastępcza stała gazowa powietrza atmosferycznego można wyrazić wzorem:

$$R_m = \frac{X}{1+X} \cdot R_{pH_2O} + \frac{1}{1+X} \cdot R_{pow} \quad (7)$$

Zgodnie z [4] zastępcza stała gazowa suchego powietrza wynosi $R_{pow}=287\text{J/kgK}$, natomiast indywidualna stała gazowa pary wodnej $R_{pH_2O}=461,5\text{J/kgK}$.

2. BADANIA SYMULACYJNE

Obliczenia przeprowadzono przy pomocy programu obliczeniowo – symulacyjnego AeroBUS.exe, napisanego w języku programowania FORTRAN 95. Działanie programu rozpoczyna się od wprowadzenia danych wejściowych dotyczących warunków atmosferycznych, geometrii modelu i prędkości autobusu. Następnie przeprowadzane są wstępne obliczenia parametrów termodynamicznych powietrza otaczającego autobus. Do właściwych obliczeń siły oporu w funkcji prędkości autobusu dochodzi w bloku C. Działanie programu kończy się na wyświetleniu wyników oraz podsumowania dla wszystkich badanych prędkości autobusu. Strukturę programu obliczeniowego przedstawiono na rys. 1. Wyniki obliczeń teoretycznych modelu dla wybranej prędkości przejazdowej zostały zweryfikowane numerycznie przy wykorzystaniu Komputerowej Mechaniki Płynów CFD.



Rys. 1. Rozkład prędkości na powierzchni czołowej badanego autobusu wraz z naniesionymi wektorami kierunku przepływu.

2.1. Obiekt badań

Obiekt analizy stanowi uproszczony model autobusu miejskiego Mercedes Conect 12LF (Rys. 2).



Rys. 2. Autobus miejski Mercedes Conecto 12LF

Parametry geometryczne, niezbędne do obliczeń przyjęto na podstawie analizy przedstawionej w pracy [7]:

- współczynnik oporu aerodynamicznego $C_x = 0,56$,
- powierzchnia czołowa modelu $A = 7,9 \text{ m}^2$.

2.2. Warunki brzegowe przyjęte do obliczeń

W Polsce można mówić o dużej różnorodności pogody, przejawiającej się w postaci aż czterech pór roku. Średnia roczna temperatura powietrza waha się od 5°C do 9°C. Obliczenia zostały oparte o dane pogodowe panujące w roku 2015 na przykładzie miasta Lublin. Warunki brzegowe opracowano na podstawie danych z Krajowego Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej oraz serwisów meteorologicznych [8]. W tab. 1 przedstawiono średnie wartości ciśnienia i temperatur panujących w porze dziennej dla analizowanego obszaru czasu.

Tab. 1. Rozkład średnich temperatur i ciśnienia atmosferycznego w Lublinie dla poszczególnych miesięcy roku 2015

Miesiąc	Temperatura [°C]	Ciśnienie [hPa]	Wilgotność względna [%]
Styczeń	2,1	987,39	69,1
Luty	3,3	986,91	66,6
Marzec	8,4	990,75	59,5
Kwiecień	11,6	985,72	51,5
Maj	17,5	985,75	61,3
Czerwiec	22,8	988,72	55,9
Lipiec	24,8	989,84	53,9
Sierpień	27,8	989,95	54,2
Wrzesień	18,6	988,32	64,5
Październik	10,2	992,45	69,4
Listopad	6,8	986,82	70,9
Grudzień	4,6	996,47	70

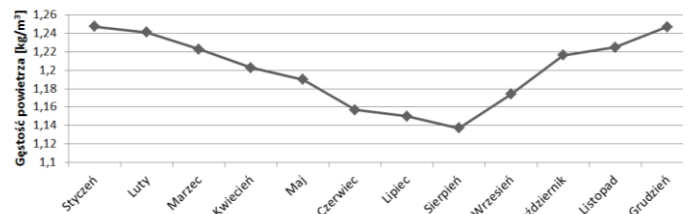
Obliczenia przeprowadzono dla warunków jazdy autobusu z prędkością: 20 km/h, 40 km/h, 60 km/h oraz 80 km/h.

2.3. Wyniki obliczeń

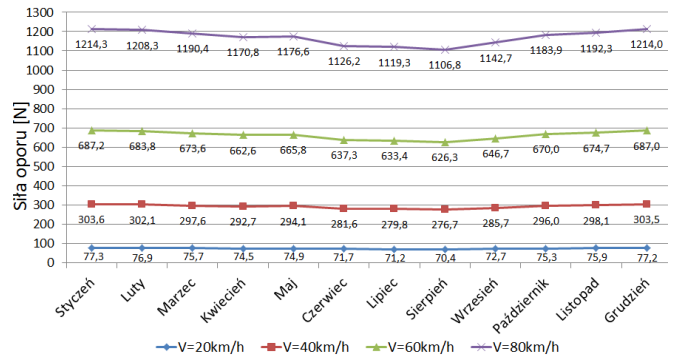
Wyniki obliczeń zestawiono w tab. 2 oraz na rys. 3 i rys. 4 w formie wykresów reprezentujących rozkłady siły oporu w zależności od pory roku i prędkości autobusu.

Tab. 2. Wyniki obliczeń dla przyjętych warunków brzegowych

Miesiąc	F ₂₀ [N]	F ₄₀ [N]	F ₆₀ [N]	F ₈₀ [N]
Styczeń	77,3	303,6	687,2	1214,3
Luty	76,9	302,1	683,8	1208,3
Marzec	75,7	297,6	673,6	1190,4
Kwiecień	74,5	292,7	662,6	1170,8
Maj	74,9	294,1	665,8	1176,6
Czerwiec	71,7	281,6	637,3	1126,2
Lipiec	71,2	279,8	633,4	1119,3
Sierpień	70,4	276,7	626,3	1106,8
Wrzesień	72,7	285,7	646,7	1142,7
Październik	75,3	296,0	670,0	1183,9
Listopad	75,9	298,1	674,7	1192,3
Grudzień	77,2	303,5	687,0	1214,0



Rys. 3. Rozkład średniej gęstości powietrza w kolejnych miesiącach roku 2015



Rys. 4. Rozkład wartości siły oporu w zależności od pory roku i prędkości autobusu

Opór aerodynamiczny rośnie wraz ze wzrostem gęstości powietrza. Najniższa średnia gęstość powietrza obserwowana jest w porze letniej od czerwca do sierpnia, natomiast najwyższa w okresie zimowym od grudnia do stycznia. Poziom oddziaływania na pojazd jest najbardziej widoczny przy najwyższej badanej prędkości przejazdowej. Wartość oporu aerodynamicznego w okresie letnim jest do 10% niższa niż w okresie zimowym.

PODSUMOWANIE

Przedstawiony w pracy program obliczeniowy umożliwia określenie oporów aerodynamicznych w zależności od warunków pogodowych w jakich badany pojazd jest użytkowany. Uzyskane wyniki świadczą o istotnym wpływie warunków atmosferycznych na poziom oporu aerodynamicznego działającego na poruszający się autobus. W przyszłości należy przeprowadzić weryfikację obliczeń przy

użyciu środowiska CFD oraz testów modelu autobusu w tunelu aerodynamicznym.

BIBLIOGRAFIA

1. Piechna J., Podstawy aerodynamiki pojazdów, WKiŁ, Warszawa 2000.
2. Hucho W. H., Aerodynamika samochodu od mechaniki przepływu do budowy pojazdu, WKiŁ, Warszawa 1988.
3. Szargut J., Termodynamika techniczna. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013
4. Wiśniewski S, Termodynamika techniczna. WNT, Warszawa 2012
5. Rościszewski K., Wit R.: Nauka Fortranu F90/95 przez przykłady dla początkujących. Skrypt internetowy (wersja z 31 III 2008)
6. Wallace J. M. and Hobbs P. V., Atmospheric science: An introductory survey. Elsevier 2006.
7. Paszko M., Analiza struktur wirowych za poruszającym się autobusem miejskim i ich wpływu na opór aerodynamiczny, Cz. 2 Numeryczny model obliczeniowy, Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe 2016, nr12 (po recenzji)

8. Źródła internetowe:

- www.institutmeteo.pl
- www.ekologia.pl

Analysis of the influence of the atmospheric conditions on the city bus aerodynamics

This paper presents an analysis of the impact of weather conditions on the level of aerodynamic drag of a city bus on the example of Mercedes Conecto model exploited by the Municipal Transport Company in Lublin. The boundary conditions for the calculation were based on data from the Institute of Meteorology and Water Management and weather services.

Autor:

mgr inż. **Mateusz Paszko** – Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Termodynamiki, Mechaniki Płynów i Napędów Lotniczych, m.paszko@pollub.pl