

KRÓL Roman¹

Modelowanie numeryczne oddziaływania pociągu na konstrukcje przytorowe

Aerodynamika, oddziaływania pociągu,
metoda objętości skończonych, CFD,
konstrukcje kolejowe

Streszczenie

W artykule przedstawiono analizę aerodynamiczną modeli lokomotyw trzech różnych typów oraz ich wpływ na konstrukcje przytorowe. Otrzymane rezultaty porównane zostały z danymi normatywnymi. Uwagę poświęcono głównie ciśnieniom generowanym przez pociągi poruszające się z prędkością 250 km/h oraz parametrom procesu obliczeniowego. Analizę wykonano przy pomocy programów Dolfyn (Cyclone Fluid Dynamics BV) oraz Autodesk Algor Simulation Multiphysics, w których do rozwiązania równań Naviera-Stokesa używana jest metoda objętości skończonych.

NUMERICAL ANALYSIS OF THE IMPACT OF A MOVING TRAIN ON A TRACK SIDE CONSTRUCTIONS

Abstract

This article presents aerodynamic analysis of three types of locomotives and their impact on a track side constructions. Obtained results have been compared with normative data. Attention was paid mainly to pressures generated by train moving with speed of 150 mph and parameters of numerical analysis process. Simulation has been prepared with use of Dolfyn (Cyclone Fluid Dynamics BV) and Autodesk Algor Simulation Multiphysics software. Navier-Stokes equations are being solved using the finite volume method.

1. WSTĘP

Wykorzystanie pociągów rozwijających prędkości do 250 km/h wymaga przeprowadzenia analizy ich wpływu aerodynamicznego na konstrukcje przytorowe. Siły aerodynamiczne generowane podczas przejazdu pociągu zależą głównie od czterech czynników: prędkości (do kwadratu), geometrii pociągu, kształtu konstrukcji i jej położenia (szczególnie odległości między konstrukcją a pociągiem)[6].

W artykule przedstawiona została analiza aerodynamiczna trzech typów lokomotyw różniących się od siebie kształtem czołowej części. We wszystkich trzech przypadkach zamodelowany został tunel aerodynamiczny z ruchomą ścianką podłogi. Analiza została przeprowadzona przy użyciu programów Dolfyn (Cyclone Fluid Dynamics) [1] i Autodesk Algor Simulation Multiphysics [2]. W celu przedstawienia wyników użyte zostały programy ParaView (Kitware i inni) [3] i VisIt (Lawrence Livermore National Security) [4]. Parametry analizy przedstawione są w tab. 1.

Tab.1. Parametry analizy aerodynamicznej

gęstość powietrza	$1.2 \cdot 10^{-9}$ [kg/mm ³]
model turbulentny	k-ε
k – energia kinetyczna turbulencji	10^{-4} [m ² /s ²]
ε – współczynnik dysypacji	10^{-4} [m ² /s ³]
intensywność turbulencji	5%
wejściowa prędkość powietrza	69.4 [m/s]
prędkość ścianki podłogi	69.4 [m/s]
czas analizy	0.01 [s]
temperatura powietrza	293 [K]
lepkość dynamiczna powietrza	$18.6 \cdot 10^{-6}$ [Pa·s]

Większość rezultatów pochodzi z programu Dolfyn, który przeznaczony jest do analizy dynamiki płynu newtonowskiego nieściśliwego. W czasie analizy rozwiązywane są równania Naviera-Stokesa (1) i (2) przy wykorzystaniu metody objętości skończonych.

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \mu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (2)$$

gdzie: \vec{v} – pole wektorowe prędkości, p – ciśnienie, μ – współczynnik lepkości kinematycznej, ρ – gęstość powietrza, \vec{f} – pole wektorowe sił masowych, t – czas, ∇ – operator Hamiltona, Δ – operator Laplace'a.

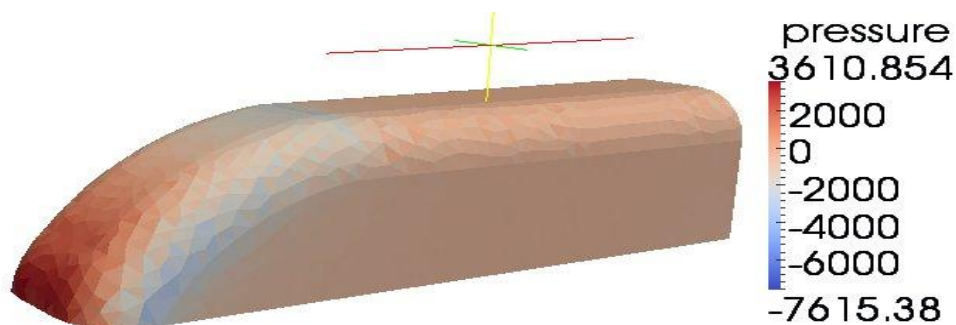
¹Politechnika Radomska im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Wydział Mechaniczny, ul. Krasickiego 54
26-600 Radom, e-mail: roman.krol@hotmail.com

2. CHARAKTERYSTYKA WPŁYWU PRZEJEŹDZAJĄCEGO POCIĄGU NA OTOCZENIE

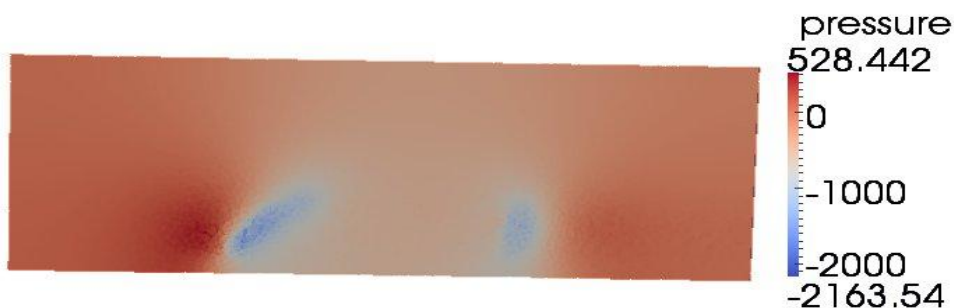
2.1 Czynniki wpływające na powstawanie sił aerodynamicznych

Czynnikiem najbardziej wpływającym na wartość sił aerodynamicznych jest prędkość pociągu. Wpływ prędkości może być zmniejszony poprzez zastosowanie opływowego kształtu czołowej części pociągu. Według [5], pociągi mające opływowy kształt przedniej części generują przy prędkości 240 km/h takie same siły aerodynamiczne jak pociągi nie posiadające opływowych kształtów przy prędkości 176 km/h.

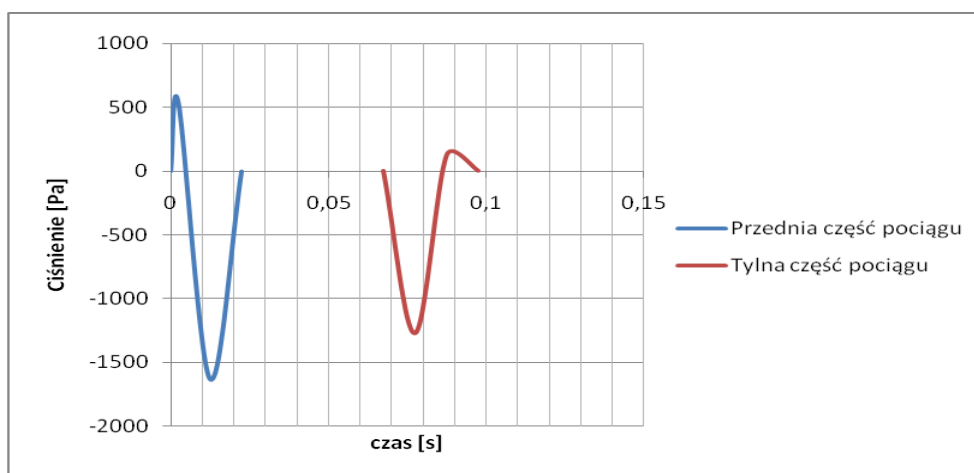
W płaszczyznach pionowych równoległych do kierunku ruchu pociągu tworzą się obszary wysokiego ciśnienia, za którymi znajdują się obszary z ujemnym ciśnieniem (rys. 1, 2 i 3). W tylnej części pociągu pojawia się strefa turbulencji (rys. 4), w której może dojść, przy dużych prędkościach, do wyrzucania żwiru na stację kolejową. Może być to rozważane jako problem bezpieczeństwa i komfortu jazdy [5].



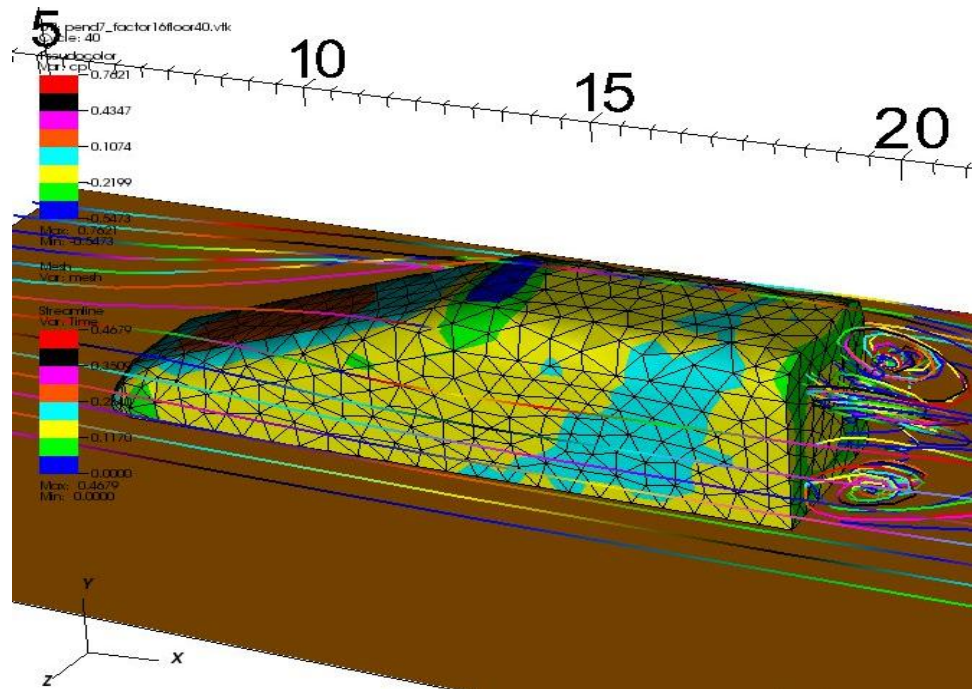
Rys.1. Kontury lokomotywy z warstwicami ciśnień [Pa]



Rys.2. Strefy podwyższonego i ujemnego ciśnienia [Pa] w przedniej i tylnej części lokomotywy z rys.1. w płaszczyźnie pionowej w odległości 2.35 m od osi toru



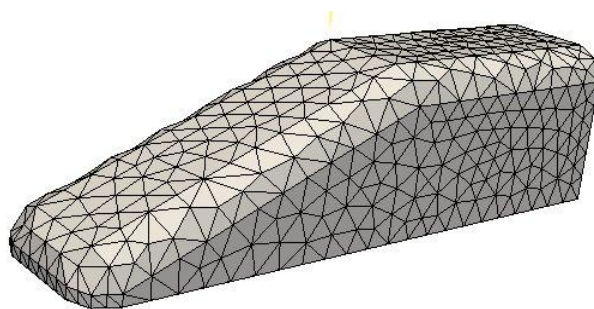
Rys.3. Ciśnienia w przedniej i tylnej części lokomotywy poruszającej się z prędkością 250 km/h w odległości 2.35 m od osi toru



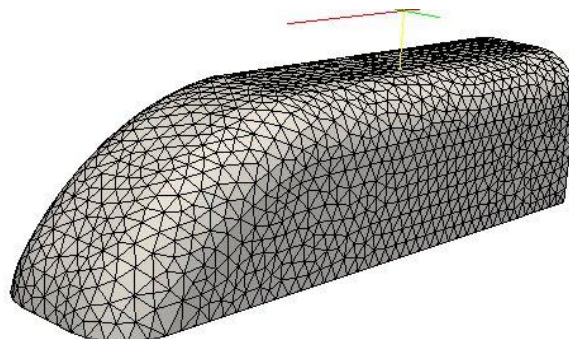
Rys. 4. Linie prądu powietrza wokół pociągu i strefa turbulencji z tyłu pociągu

2.2 Geometria lokomotyw poddanych analizie

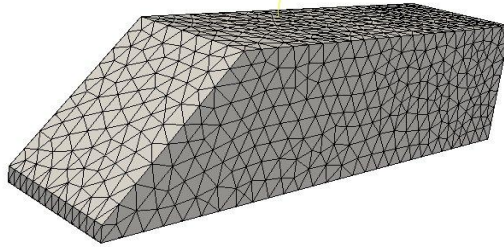
Na rys. 5 – rys. 7 pokazane są siatki niestructuralne dla trzech typów analizowanych lokomotyw. Lokomotywa pierwszego typu posiada wydłużoną czołową część (kształt podobny do Pendolino), druga posiada opływowy kształt (podobieństwo do pociągu Bombardier Zefiro) a trzecia jest pozbawiona opływowego kształtu (może być porównana do popularnych lokomotyw starszego typu).



Rys. 5. Lokomotywa pierwszego typu z wydłużoną czołową częścią

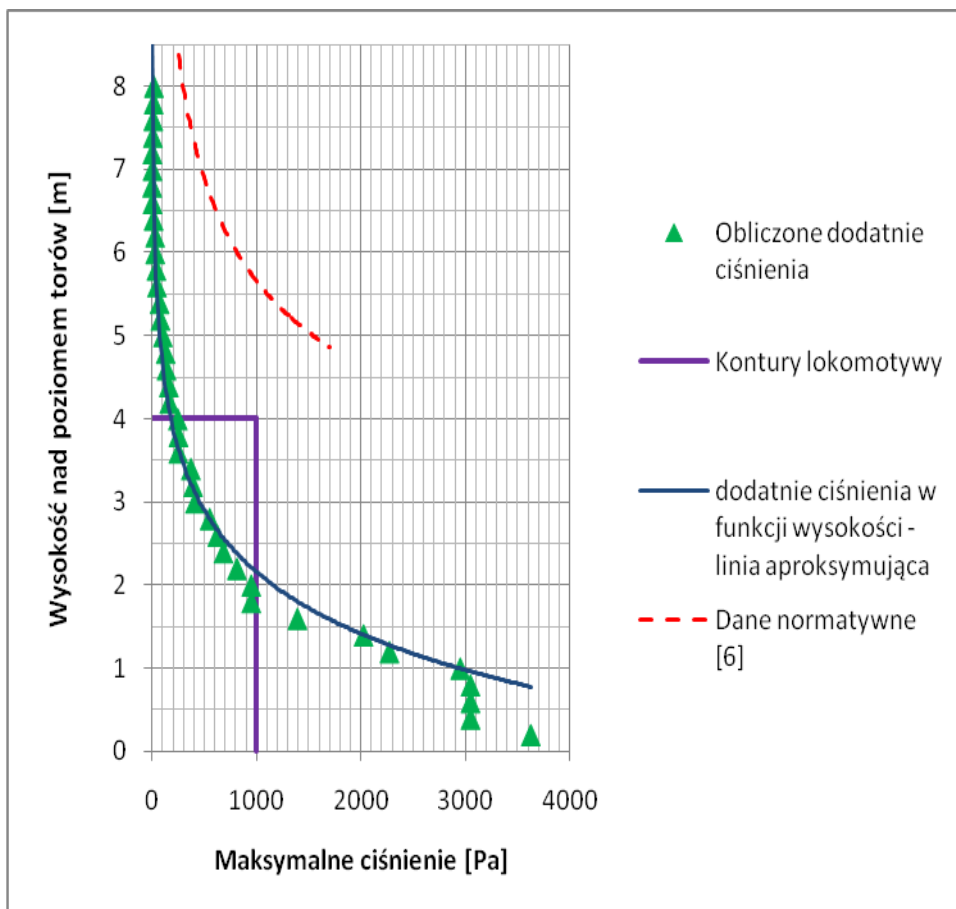


Rys. 6. Lokomotywa drugiego typu z opływowym kształtem przedniej części

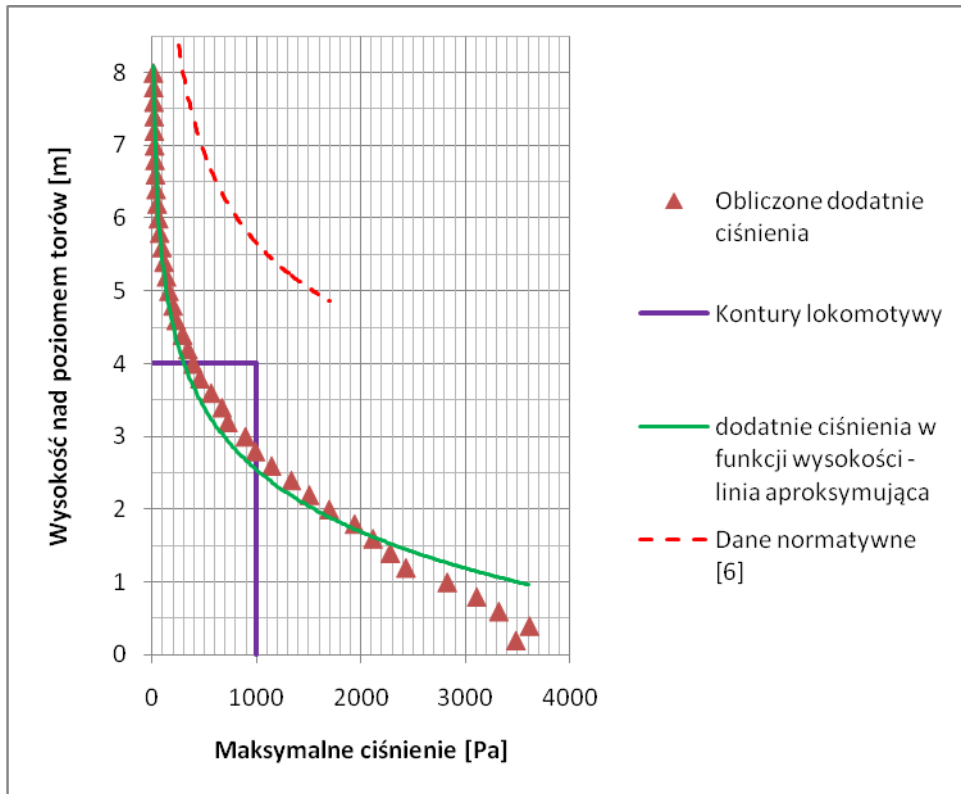


Rys. 7. Lokomotywa trzeciego typu z nie opływowym kształtem

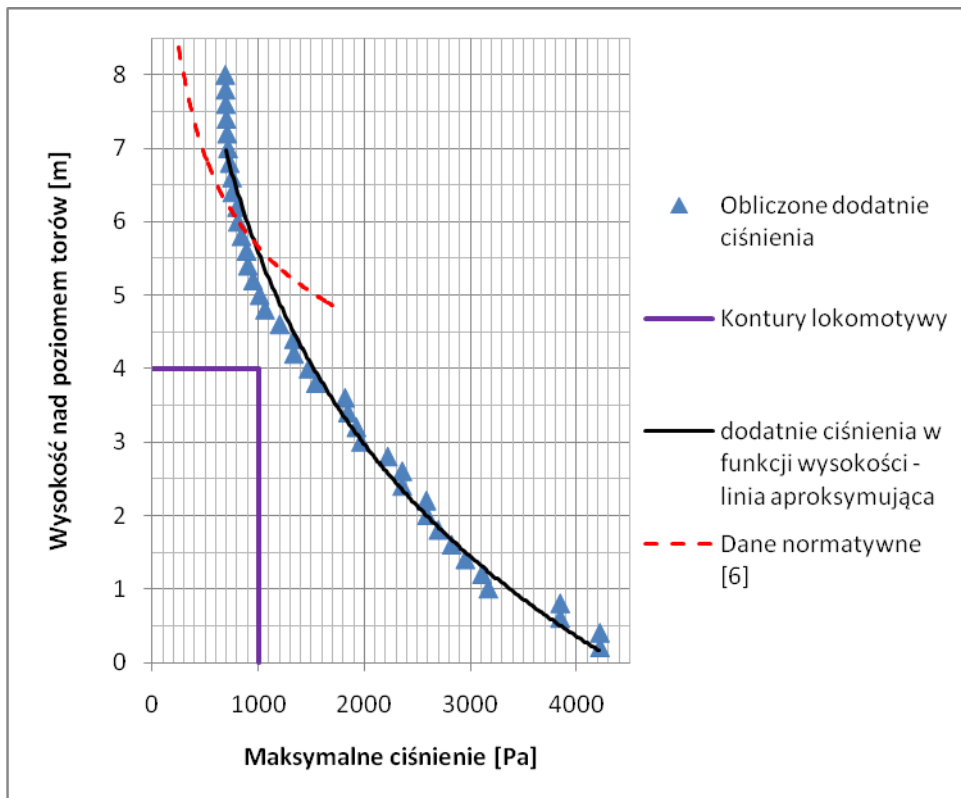
2.3 Wpływ przejeżdżającego pociągu na konstrukcje przytorowe w zależności od wysokości danej konstrukcji ponad torem



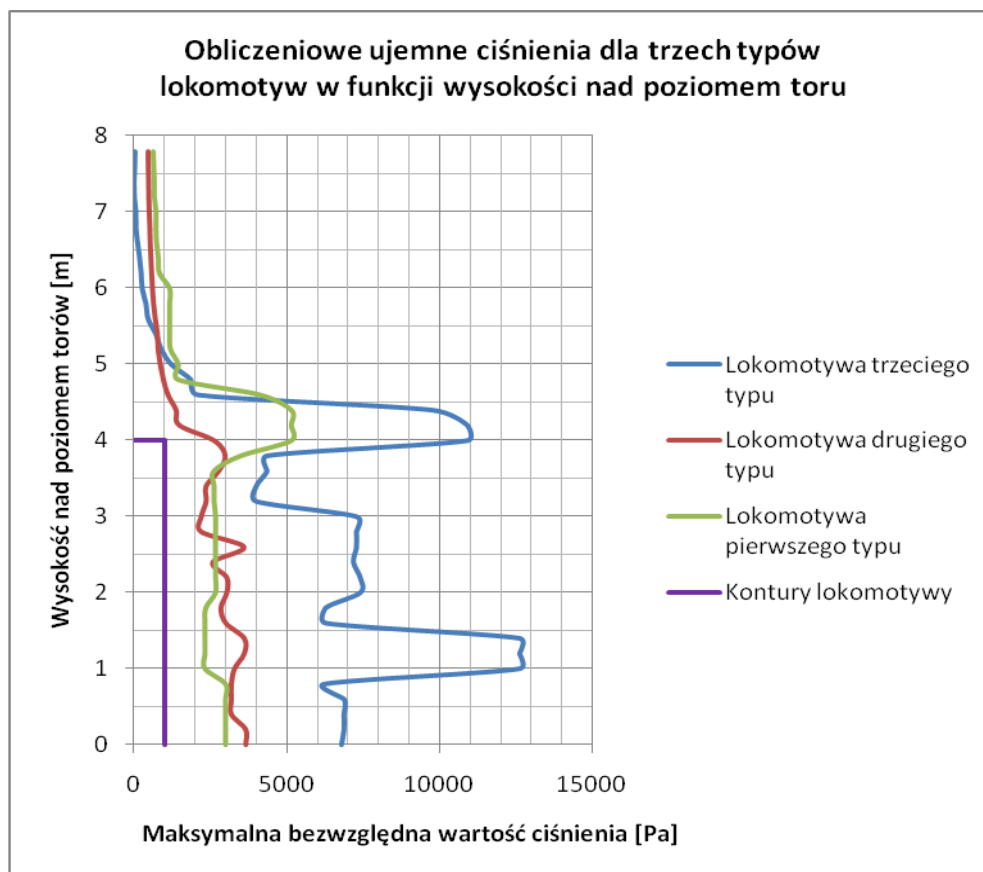
Rys. 8. Lokomotywa pierwszego typu. Dodatnie ciśnienia w funkcji wysokości nad poziomem torów



Rys. 9. Lokomotywa drugiego typu. Dodatnie ciśnienia w funkcji wysokości nad poziomem torów



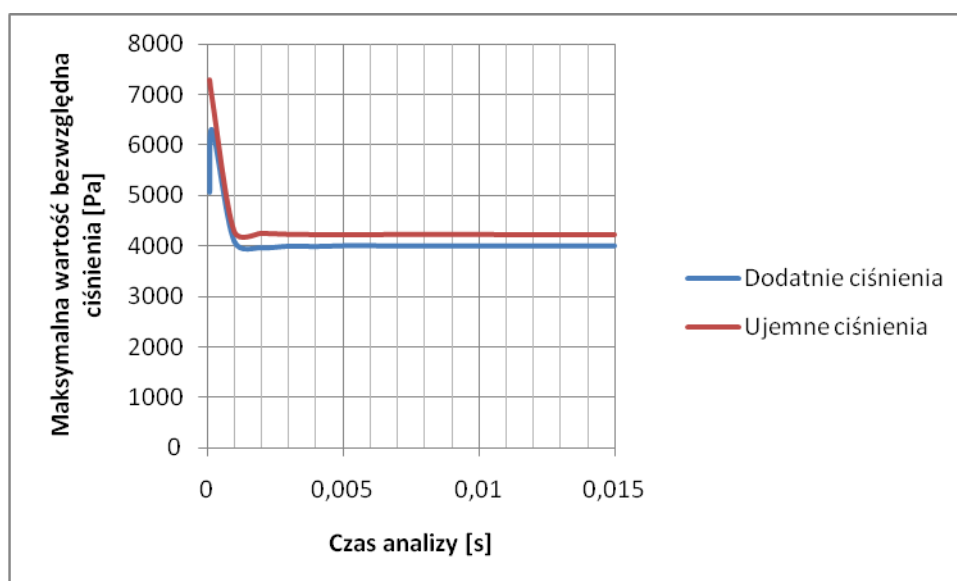
Rys. 10. Lokomotywa trzeciego typu. Dodatnie ciśnienia w funkcji wysokości nad poziomem torów



Rys. 11. Ujemne wartości ciśnień w funkcji wysokości nad poziomem torów dla trzech typów lokomotyw

3. PARAMETRY OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH

Na potrzeby obliczeń rzeczywiste wymiary analizowanych pociągów zostały przeskalowane ze współczynnikiem 0.001. W celu otrzymania danych przedstawionych na rys. 8 – rys. 11 ustalono czas analizy na 1000 kroków co 10^{-5} s. Daje to czas analizy równy 0.01 s. Przy powyższych założeniach stabilizacja maksymalnych z całego modelu ciśnień następuje już po 200 krokach obliczeń (rys. 12). Natomiast pełna stabilizacja przepływu następuje po około 400 krokach czasowych, czyli po 0.004 s. Szczegółowe wartości ciśnień w funkcji czasu umieszczone zostały w tab. 2.

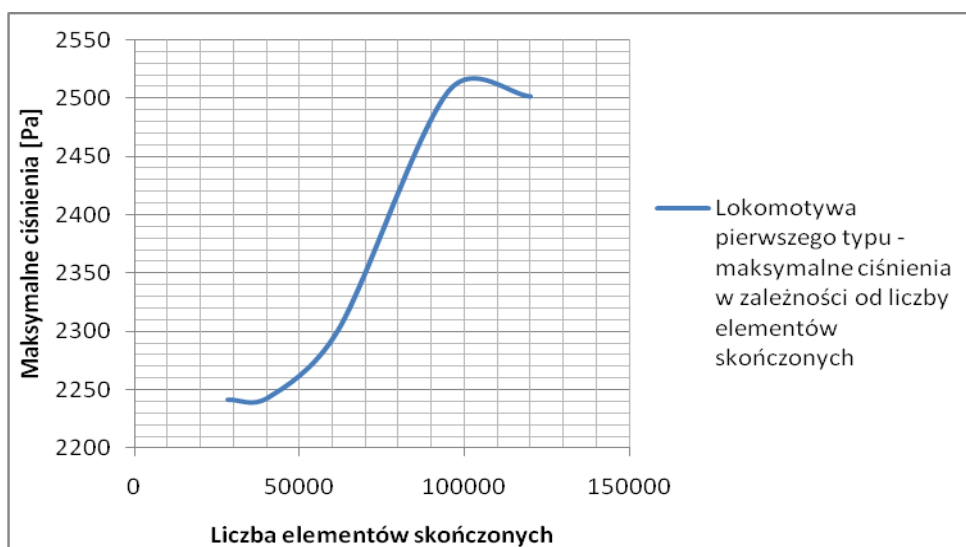


Rys. 12. Maksymalne dodatnie i maksymalne ujemne ciśnienia w zależności od czasu analizy

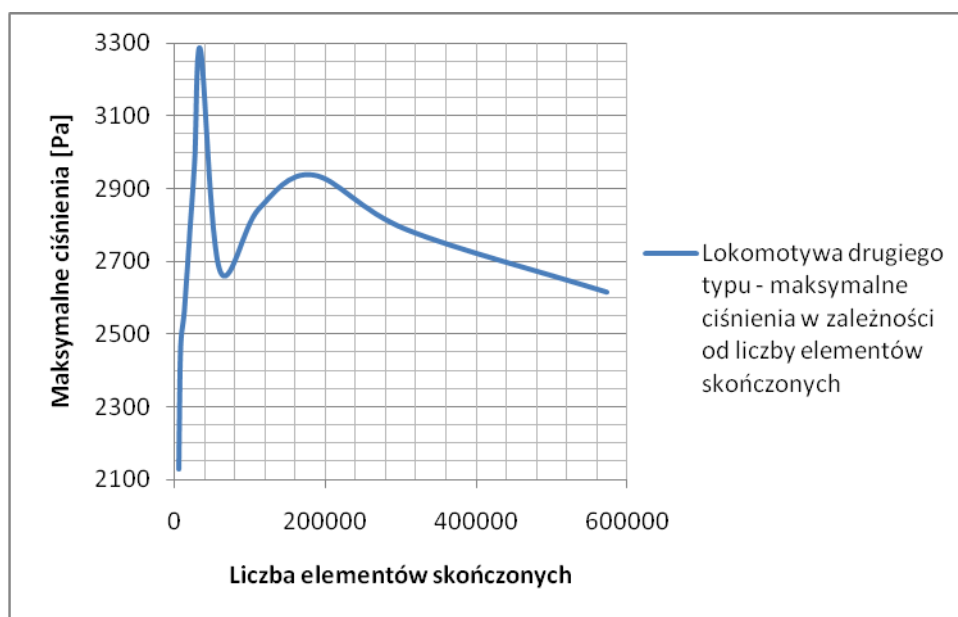
Tab.2. Ciśnienia w zależności od czasu analizy

Czas analizy [s]	Maksymalne dodatnie ciśnienia [Pa]	Maksymalne ujemne ciśnienia [Pa]
0,0001	5067	7304
0,0002	6291	6910
0,001	4104	4293
0,002	3976	4248
0,003	4005	4229
0,004	3999	4223
0,005	4014	4225
0,006	4014	4223
0,007	4012	4224
0,015	4012	4223

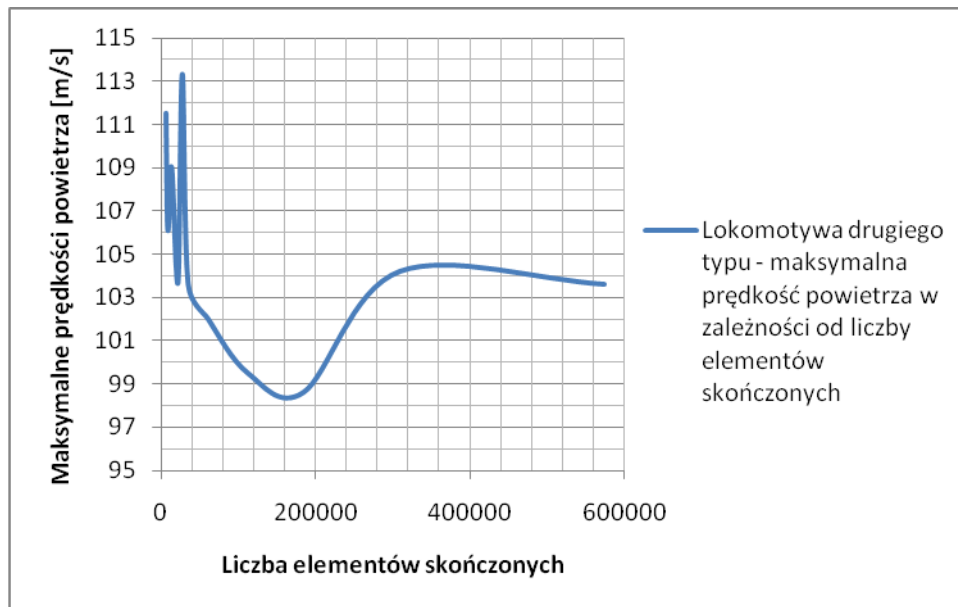
Przeprowadzono także analizę zbieżności danych reprezentujących ciśnienia oraz prędkości powietrza przepływającego w modelu tunelu aerodynamicznego wokół lokomotywy w zależności od liczby elementów skończonych, na które podzielony został obszar reprezentujący płyn (powietrze). Dane przedstawione na rys. 13 – rys. 16 pochodzą z programu Algor [2].



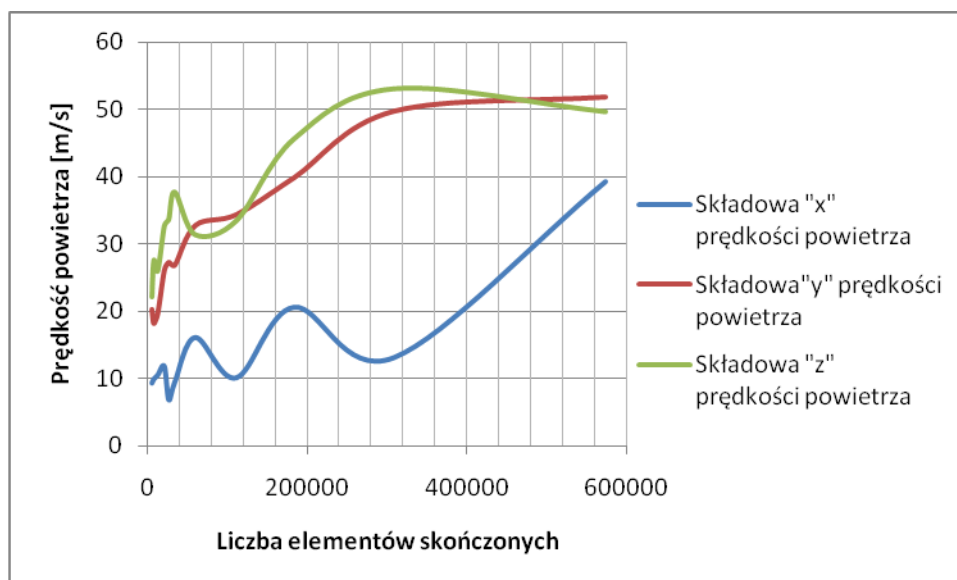
Rys. 13. Maksymalne ciśnienia w otoczeniu lokomotywy pierwszego typu w zależności od liczby elementów skończonych



Rys. 14. Maksymalne ciśnienia w otoczeniu lokomotywy drugiego typu w zależności od liczby elementów skończonych



Rys. 15. Maksymalna prędkość powietrza w otoczeniu lokomotywy drugiego typu w zależności od liczby elementów skończonych



Rys. 16. Składowe „x”, „y” i „z” prędkości powietrza w zależności od liczby elementów skończonych dla lokomotywy drugiego typu

4. WNIOSKI

Zbieżność wyników obliczeń ciśnienia wokół lokomotywy pierwszego typu następuje przy liczbie elementów skończonych wynoszącej 120 tysięcy. Świadczą o tym wyniki przedstawione na rys. 13. Dalsze zagęszczanie siatki dla tego typu lokomotywy prowadziło do problemów obliczeniowych. Lokomotywa drugiego typu była analizowana przy siatkach z liczbą elementów skończonych do 600 tysięcy. Stabilizacja wyników widoczna jest dla lokomotywy drugiego typu już przy siatkach z liczbą elementów skończonych równą 280 tysięcy. Przy tej liczbie elementów skończonych także prędkość powietrza (rys. 15) ulega stabilizacji i wynik można uznać za wiarygodny. Wyniki uzyskane w programie Dolfyn [1] (rys. 8 – rys. 11) świadczą o tym, że największy wpływ na konstrukcje przytorowe wywiera lokomotywa trzeciego typu. Lokomotywa pierwszego typu generuje najmniejsze dodatnie ciśnienia powyżej poziomu dachu z uwagi na wydłużoną czołową część. Występują jednak w tym obszarze istotne ujemne ciśnienia (rys. 11). Spośród trzech lokomotyw, lokomotywa drugiego typu wywiera najmniejsze ciśnienia na konstrukcje przytorowe.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Cyclone Fluid Dynamics BV; Dolfyn, www.dolfyn.net
- [2] Autodesk; Algor Simulation Multiphysics, www.autodesk.pl
- [3] Kitware Inc., Los Alamos National Laboratory, Sandia National Laboratories, U.S. Army Research Laboratory, CSimSoft, Advanced Simulation and Computing ASC; ParaView, www.paraview.org
- [4] Lawrence Livermore National Security; VisIt, visit.llnl.gov
- [5] Harvey Shui-Hong Lee; „Assessment of Potential Aerodynamic Effects on Personnel and Equipment in Proximity to High-Speed Train Operations. Safety of High-Speed Ground Transportation Systems”
- [6] Norma Europejska EN 1991-2:2003 „Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje Część 2: Obciążenia ruchome mostów”, Polski Komitet Normalizacyjny