

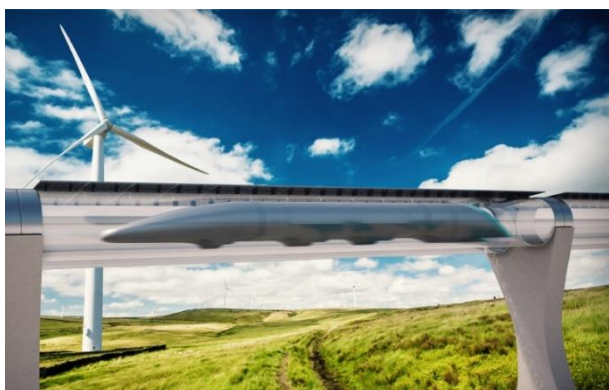
Marcin NOWACKI, Damian OLEJNICZAK, Jarosław MARKOWSKI

OCENA SIŁY OPORU POWIERZCHNI CZOŁOWEJ KAPSUŁY SYSTEMU HYPERLOOP W SYMULOWANYCH WARUNKACH RUCHU

Wzrastające potrzeby transportowe społeczeństw skłaniają konstruktorów i wynalazców do szukania nowych sposobów ich zaspokojenia. Ograniczeniem w realizacji nowych koncepcji jest aktualny poziom technologiczny i społeczny. Połączenie zalet transportu kolejowego z cechami transportu lotniczego dało początek koncepcji nowego systemu transportowego zwanego Hyperloop. Projekt zakłada, że system będzie miał strukturę systemu rurociągowego, w którego wnętrzu będzie przemieszczała się kapsuła transportowa. Dla uzyskania dużych prędkości kapsuła zakłada się, że w rurociągu będzie występowało zmniejszone ciśnienie. Umożliwi to zmniejszenie strat wynikających z oporów ruchu przemieszczającej się kapsuły. W artykule przeprowadzono badania i analizy warunków eksploatacyjnych kapsuły i dokonano oceny siły oporu powierzchni czołowej kapsuły podczas ruchu. Badania i analizy podjętego zagadnienia przeprowadzono z wykorzystaniem obecnie dostępnych narzędzi numerycznych.

WSTĘP

Ograniczenie emisji do atmosfery związków szkodliwych dotyczy szeroko rozumianej działalności człowieka [3, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. Działania te ściśle związane są z ograniczeniem zużycia energii we wszystkich dziedzinach przemysłu i procesów funkcyjnych społeczeństwa [3, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. Szczególną uwagę poświęca się zmniejszeniu emisji dwutlenku węgla dążąc do zmniejszenia zużycia paliw kopalnych w produkcji energii z wykorzystaniem procesów spalania [6, 7, 8, 11, 12]. Zagadnienia związane z szeroko rozumianym działaniem zmierzającym do zmniejszenia zużycia energii, a przez to zmniejszenia emisji CO₂ występują we wszystkich dziedzinach przemysłu tj. energetyce, produkcji, rolnictwie, motoryzacji i transporcie [6, 7, 8, 11, 12]. Istniejące zapotrzebowanie energetyczne generowane przez rozwijające się społeczeństwo jest pokrywane częściowo przez wykorzystanie odnawialnych źródeł energii. Ale jest to jeden z kierunków działań. Drugim kierunkiem jest opracowywanie urządzeń wytwarzających energię, charakteryzujących się dużą sprawnością. Trzecim działaniem jest opracowywanie nowych urządzeń i systemów spełniających znane funkcje przy jednoczesnym zmniejszeniu ich zapotrzebowania energetycznego [3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]. Opracowywane są koncepcje nowych systemów energetycznych do napędu środków transportu oraz nowe koncepcje systemów transportowych. Jednym z przykładów nowych systemów transportowych jest system szybkiego transportu rurowego zwany Hyperloop.

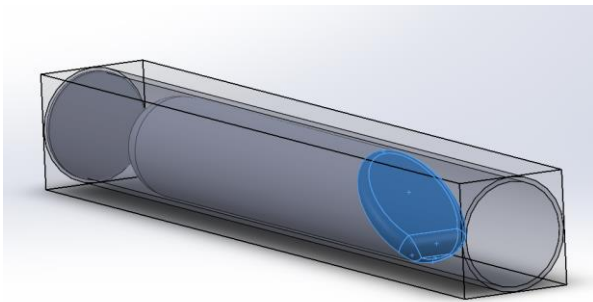


Rys. 1 Wizualizacja systemu hyperloop [13]

Idea systemu Hyperloop zakłada, transport ludzi i towarów w systemie rurociągowym zamkniętym z wykorzystaniem kapsuł transportowych przemieszczających się z dużą prędkością. Założenia te planuje się zrealizować przy zastosowaniu odpowiednich warunków występujących we wnętrzu toru rurowego, w którym ma się przemieszczać kapsuła transportowa. Zakłada się, że kapsuła ma się przemieszczać w ośrodku o małej gęstości, co ma przyczynić się do zmniejszenia oporów ruchu kapsuły i zapewnić możliwości uzyskania jej dużych prędkości ruchu. Działanie to ma się również przełożyć na zmniejszenie zapotrzebowania na energię oraz zmniejszając koszty eksploatacji [5, 11, 14, 15]. Warunki panujące wewnątrz rurociągu będącego torem dla poruszania się kapsuły mają kluczowe znaczenie w osiągnięciu zakładanych rezultatów. Przeprowadzenie badań metodami numerycznymi daje możliwość zobrazowania oddziaływających na system zjawisk i optymalnego projektowania systemu od podstaw. Optymalizacja kształtu kapsuły ma bezpośredni wpływ na zużycie energii przez system, dlatego głównym kryterium przeprowadzonych badań jest wpływ kształtu powierzchni czołowej na powstawanie siły oporu.

1. METODOLOGIA BADAŃ

Przedstawione ogólne założenia koncepcji systemu Hyperloop wskazują na dążenie w kierunku zmniejszenia oporów związanych z ruchem kapsuły transportowej. W systemie stosowanej koncepcji toru rurowego przewiduje się zmniejszenie ciśnienia czynnika znajdującego się we wnętrzu toru. Pomimo takiego założenia, przy planowanych dużych prędkościach przemieszczania się kapsuły transportowej występuje spiętrzenie czynnika w objętości przed przemieszczającą się kapsułą. W związku z tym przeprowadzono badania numeryczne w symulowanych warunkach ruchu kapsuły zmierzające do oceny występujących warunków zwiększenia wartości ciśnienia czynnika i skutków jego oddziaływania na kapsułę. Na podstawie przeprowadzonych badań dokonano analizy wpływu kształtu powierzchni czołowej kapsuły przemieszczającej się w zamkniętej przestrzeni rurociągu na występujące siły oporu ruchu. Wykonane badania polegały na symulacji ruchu modelu kapsuły (rys. 1.) wewnątrz rurociągu.



Rys. 2 Kształt powierzchni czołowej modelu

Badania zostały wykonane dla pięciu wartości prędkości kapsuły v_{cap} : 70 m/s, 140 m/s, 200 m/s, 340 m/s oraz dwóch wartości ciśnienia panującego w rurociągu $p_{cz} = 10130$ Pa oraz $p_{cz} = 101300$ Pa. Dokonano oceny wartości średniej ciśnienia występującego na powierzchni czołowej modelu i na jej podstawie oszacowano siłę oporu działającą na kapsułę wynikającą z wartości ciśnień działających na powierzchnię czołową. Kluczowym podejściem analizy było wyodrębnienie składowej siły działających w kierunku osi wzdłużnej Z przemieszczającej się kapsuły. Powierzchnia czołowa modelu to 13,85 m².

2. WYNIKI BADAŃ

Analiza wyników badań numerycznych polegała na oszacowaniu wartości ciśnień czynnika kumulującego się przed kapsułą podczas jej ruchu w torze rurowym dla założonych wartości prędkości kapsuły i dla przyjętych wartości ciśnienia czynnika w systemie rurociągu. Dokonano zestawienia wyników dla analizowanej powierzchni czołowej kapsuły zgodnie z przyjętą metodyką, a dla zobrazowania wyników przedstawiono rozkłady ciśnień na powierzchni czołowej dla czterech wariantów (rys. 3–6). Są to obrazy rozkładu ciśnienia oraz postaci przepływu na powierzchni czołowej kapsuły dla uzyskanych wyników przy symulacji następujących przypadków: prędkość kapsuły $v_{cap} = 70$ m/s i ciśnienie czynnika w przestrzeni toru rurowego $p_{cz} = 10130$ Pa; prędkość kapsuły $v_{cap} = 340$ m/s i ciśnienie czynnika w przestrzeni toru rurowego $p_{cz} = 10130$ Pa; prędkość kapsuły $v_{cap} = 70$ m/s i ciśnienie czynnika w przestrzeni toru rurowego $p = 101300$ Pa; prędkość kapsuły $v_{cap} = 340$ m/s i ciśnienie czynnika w przestrzeni toru rurowego $p_{cz} = 101300$ Pa.

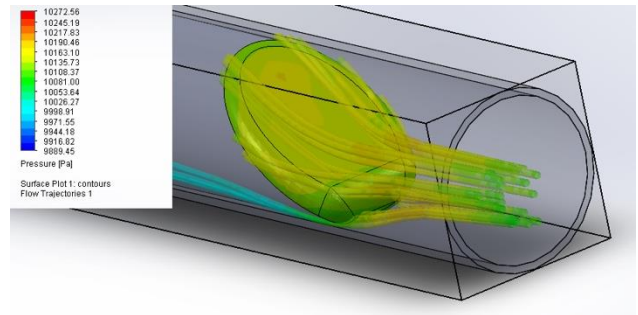
Analiza wyników badań polega na określeniu wartości siły oporu działającej na powierzchnię czołową kapsuły. Wartość siły oporu F_R zależy od wartości średniej ciśnienia działającego na powierzchnię czołową kapsuły i opisywany jest zależnością [2]:

$$F_R = C_x \cdot \rho \cdot A \cdot v_{cap}^2 \cdot g \quad [N] \quad (1)$$

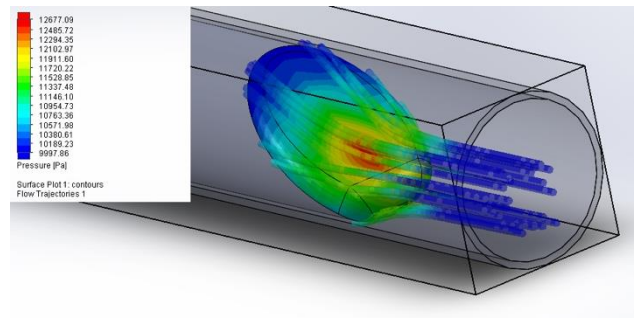
gdzie:

- C_x – współczynnik oporu powietrza,
- ρ – gęstość czynnika w torze rurowym [kg/m³],
- A – pole powierzchni czołowej [m²],
- v_{cap} – prędkość kapsuły [m/s],
- g – przyspieszenie ziemskie [m/s²].

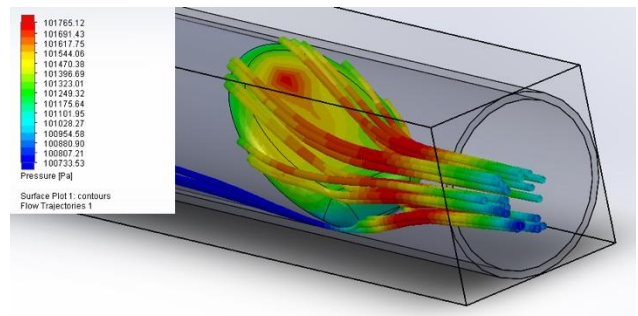
Do przeprowadzenia obliczeń zgodnie z przedstawionym postępowaniem konieczne było wyznaczenie wartości średniej ciśnienia oddziaływującego na powierzchnię czołową kapsuły p_{sr} w kierunku zgodnym z kierunkiem osi wzdłużnej kapsuły, gęstości czynnika przed przemieszczającą się kapsułą ρ oraz wartości współczynnika C_x dla analizowanej kapsuły.



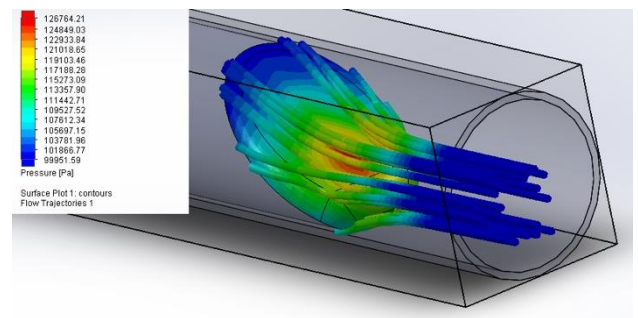
Rys. 3 Postać rozkładu ciśnienia na powierzchni czołowej (70 m/s 10130 Pa)



Rys. 4 Postać rozkładu ciśnienia na powierzchni czołowej (340 m/s 10130 Pa)



Rys. 5 Postać rozkładu ciśnienia na powierzchni czołowej (70 m/s 101300 Pa)



Rys. 6 Postać rozkładu ciśnienia na powierzchni czołowej (340 m/s 101300 Pa)

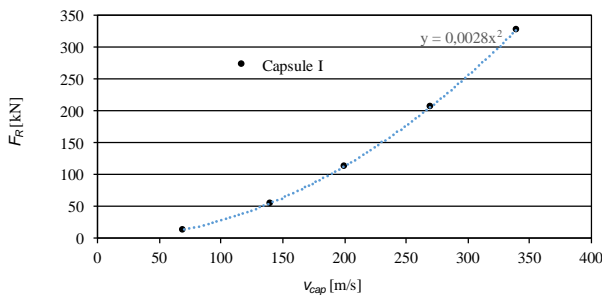
Wartości średniego ciśnienia p_{sr} działającego na powierzchnię czołową kapsuły wyznaczono za pomocą oprogramowania SolidWorks z dodatkiem Flow Simulation i zamieszczono je w tabeli 1. Gęstość czynnika ρ_{cz} przed przemieszczającą się kapsułą związana jest bezpośrednio z wartością średniego ciśnienia występującego na powierzchni czołowej kapsuły oraz prędkości poruszania się kapsuły. Dla każdej symulowanej prędkości wykonano obliczenia

wartości gęstości czynnika przed poruszającą się kapsułą, co zamieszczono w tabeli 1. Wartości siły oporu F_R dla poszczególnych analizowanych przypadków wyznaczono i zamieszczono w tabeli 1.

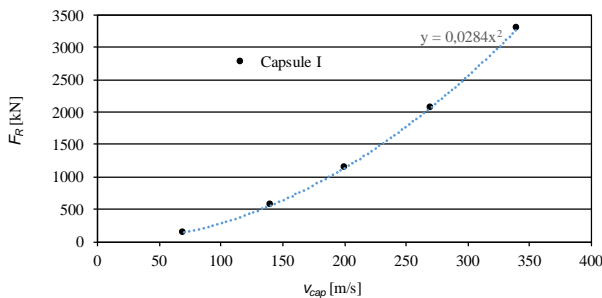
Tab 1. Wyniki przeprowadzonych badań na modelu kapsuły.

Kapsuła I					
ρ_{cz} [Pa]	10130				
ρ_{sr} [Pa]	10147	10264	10445	10769	11168
R [J/(kg·K)]	287				
ρ [kg/m ³]	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13
C_x [-]	0,17				
v_{cap} [m/s]	70	140	200	270	340
F_R [kN]	14	56	114	207	328
101300					
ρ_{cz} [Pa]	101300				
ρ_{sr} [Pa]	101462	102640	104446	107674	111660
ρ [kg/m ³]	1,21	1,22	1,24	1,28	1,33
F_R [kN]	139	557	1136	2071	3284

W kolejnym kroku dokonano zestawienia wartości siły oporu powierzchni czołowej kapsuły F_R . Zestawieniu poddano wartości siły oporu powierzchni czołowej kapsuły przy ciśnieniu czynnika w rurociągu $p_{cz} = 10130$ Pa (rys. 7), oraz wartości siły oporu powierzchni czołowej kapsuły przy ciśnieniu czynnika w rurociągu $p_{cz} = 101300$ Pa (rys. 8).



Rys. 7 Zależność siły oporu od prędkości kapsuły przy symulowanej wartości $p_{cz} = 10130$ Pa



Rys. 8 Zależność siły oporu od prędkości kapsuły przy symulowanej wartości $p_{cz} = 101300$ Pa

Badania przeprowadzone dla zamodelowanej powierzchni czołowej kapsuły przy przyjętych dwóch wartościach ciśnienia czynnika znajdującego się w przestrzeni toru rurowego wskazują ścisłą zależność generowanej siły oporu od wartości ciśnienia czynnika znajdującego się w torze rurowym. Zmiana jeden rząd wartości ciśnienia czynnika generuje zmianę o jeden rząd w wartościach siły oporu powierzchni czołowej kapsuły. Wartości siły oporu powierzchni czołowej kapsuły rosną wraz ze zwiększaniem się prędkości poruszania. Zaobserwować można nieliniową zależność przyrostów wartości siły oporu od prędkości poruszania. Różnice pomiędzy wartościami siły oporu czołowego przy wyższych prędkościach są wyższe niż w przypadku niskich prędkości poruszania się kapsuły. Świadczy to o konieczności doboru odpowiedniej dla danych warunków prędkości poruszania się kapsuły. Zależność siły oporu czołowego od prędkości

poruszania się kapsuły przy ciśnieniu czynnika w rurociągu można $p_{cz} = 10130$ Pa można opisać przykładowym równaniem $F_r = 0,0028 \cdot v_{cap}^2$, natomiast przy ciśnieniu $p_{cz} = 101300$ Pa zależność ta przyjmuje postać $F_r = 0,0284 \cdot v_{cap}^2$.

WNIOSKI

Obniżenie ciśnienia wewnątrz rurociągu skutkuje mniejszymi o rząd wielkości wartościami siły oporu działającej na powierzchnię czołową analizowanej kapsuły. Przekłada się to na podobną zależność w odniesieniu do wartości siły oporu działającej na powierzchnię czołową, w określonych prędkościach ruchu kapsuły. Zwiększenie prędkości kapsuły związane jest ze zwiększeniem siły oporu czołowego kapsuły a opisane jest przykładowym równaniem $F_r = 0,00282 \cdot v_{cap}^2$. Konieczne jest przeprowadzenie analizy związanej z określeniem najkorzystniejszej wartości prędkości kapsuły w systemie ze względu na rozmiar różnic siły oporu.

BIBLIOGRAFIA

- Dudek M., Socha R., *Direct Electrochemical Conversion of the Chemical Energy of Raw Waste Wood to Electrical Energy in Tubular Direct Carbon Solid Oxide Fuel Cells*, INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTROCHEMICAL SCIENCE, Volume: 9, Issue: 12 Pages: 7414-7430, 2014
- Gryboś R., *Mechanika płynów*, SKRYPTY UCZELNIANE nr 1654, Politechnika Śląska, 1991
- Hunicz J., *An experimental study into the chemical effects of direct gasoline injection into retained residuals in a homogeneous charge compression ignition engine*, INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINE RESEARCH, Volume: 17, Issue: 10, Pages: 1031-1044, DOI: 10.1177/1468087416636492, 2016
- Jakubowski R., *Evaluation of performance properties of two combustor turbofan engine*, EKSPLOATACJA I NIEZAWODNOSC-MAINTENANCE AND RELIABILITY, Volume: 17, Issue: 4, Pages: 575-581, DOI: 10.17531/ein.2015.4.13, 2015
- Markowski J., Pielecha J., Jasinski R., *Model to assess the exhaust emissions from the engine of a small aircraft during flight*, 12th International Scientific Conference of Young Scientists on Sustainable, Modern and Safe Transport, Book Series: Procedia Engineering, Volume: 192, Pages: 557-562, 2017
- Markowski J., Pielecha J., Jasiński R., Kniaziewicz T., Wirkowski P., *Development of alternative ship propulsion in terms of exhaust emissions*, 1st International Conference on the Sustainable Energy and Environment Development (SEED), Book Series: E3S Web of Conferences, Volume: 10, Article Number: UNSP 00140, 2016
- Pielecha I., *Diagnostics of stratified charge combustion under the conditions of multiple gasoline direct injection*, JOURNAL OF THERMAL ANALYSIS AND CALORIMETRY, Volume: 118, Issue: 1 Pages: 217-225, DOI: 10.1007/s10973-014-3956-3, 2014
- Pielecha I., *Modeling of gasoline fuel spray penetration in sidi engines*, INTERNATIONAL JOURNAL OF AUTOMOTIVE TECHNOLOGY, Volume: 15 Issue: 1 Pages: 47-55, DOI: 10.1007/s12239-014-0005-y, 2014
- Rudnicki J., Zadrag R., *Problems of Modelling Toxic Compounds Emitted by a Marine Internal Combustion Engine in Unsteady States*, 31.01.2015 | DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2014-0042>
- Sobiecka E., Olejnik T., *Utilitarian Technological Solutions to Reduce CO2 Emission in the Aspect of Sustainable Development*, PROBLEMY EKOROZWOJU, Volume 12, no 2, Pages 173-179, 2017

11. Warchoł R., Górski J., *Technologies of CO2 Emission Reduction in the Power Generation Cycles*, CHEMIA I INŻYNIERIA EKOLOGICZNA, Volume: 10, no 11, Pages: 1185-1198, 2003
12. Zadrag R., *Supporting the Empirical Research on Diesel Engines with Multi-Equation Models*, ADVANCES IN MECHATRONIC SYSTEMS, MECHANICS AND MATERIALS, Book Series: Solid State Phenomena, Volume: 196, Pages: 74-81, 2013
13. <https://d.wpimg.pl/720478061-910534587/hyperloop.jpg>
14. <https://hyperloop-one.com/hyperloop-explained>
15. <http://hyperloop.global/press/>

Assessment of the medium parameters in the closed space for the proposal of the hyperloop transport capsule in the aspect of reducing the energy demand of the transport system

Increasing transport needs of societies prompt constructors and inventors to seek new ways of satisfying them. The current technological and social level is limited in implementing new concepts. Combining the advantages of rail transport

with the characteristics of air transport gave rise to the concept of a new transport system called Hyperloop. The design assumes that the system will have a pipeline structure in which the transport capsule moves. For high velocity capsules it is assumed that the pressure in the pipeline will be reduced. This will reduce the losses resulting from the movement resistance of the moving capsule. The paper analyzes the operating conditions of the capsule and evaluates the resistance of the capsule's face during movement. Research and analysis of the issue was carried out using currently available numerical tools.

Autorzy:

mgr inż. **Marcin Nowacki** – Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, e-mail: marcin.ro.nowacki@doctorate.put.poznan.pl

mgr inż. **Damian Olejniczak** – Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, e-mail: damian.a.olejniczak@doctorate.put.poznan.pl

dr hab. inż. **Jarosław Markowski**, prof. PP – Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Instytut Silników Spalinowych i Transportu,

e-mail: jaroslaw.markowski@put.poznan.pl