

## Konceptcja systemu transportowego na powierzchni Księżyca i Marsa



**Piotr A. Wrzecioniarz**

University Professor

Instytut Inwentyki, CEO,  
Politechnika Wrocławska (em),  
Uniwersytet Przyrodniczy (em),  
Collegium Witelona

piotr.wrzecioniarz@tvvpol.pl



**Karol Mierzwa**

Absolwent Politechniki  
Wrocławskiej

karol.r.mierzwa@gmail.com



**Dominik Liśkiewicz**

Absolwent Politechniki  
Wrocławskiej

inz.domlis@gmail.com



**Piotr Pezowicz**

Dr

Instytut Inwentyki

info@tvvpol.pl

**Streszczenie:** Na bazie wcześniejszych własnych projektów systemu Hyperloop dla warunków ziemskich zaproponowano koncepcję tego typu transportu dla Księżyca i Marsa. Podano podstawowe parametry techniczne przedstawione i przedyskutowane na konferencjach IAC w Dubaju wykazując dużą gotowość technologiczną projektu.

**Słowa kluczowe:** Hyperloop; Księżyc; Mars

### Wprowadzenie

Rozwój transportu zbiorowego oraz masowego na Ziemi przyspieszył nieco ponad 100 lat temu co jest powszechnie wiadome. Kroki realizowane w ramach tak zwanego „podboju kosmosu” związane z transportem na powierzchni Księżyca i ewentualnie Marsa będą realizowane niebawem. Jest oczywistym, że projektanci wykorzystają to co znamy z ziemskich rozwiązań, będą jednak musieli zmierzyć się z innymi warunkami a zatem inne będą szczegóły. Prace nad tym zagadnieniem zostały podjęte na Politechnice Wrocławskiej około 15 lat temu. Wówczas to podjęto szereg problemów podobnie jak działa się to w grupie Elona Maska w umownej tzw. „Dolinie Krzemowej”, gdzie obok elektromobilności i autonomii ruchu rozważano także zagadnienia z systemu transportowego typu Hyperloop. W opracowaniu przygotowanym

na konkurs NCBiR przedstawiono koncepcję polskiego Hyperloop’a wielokrotnie tańszego od rozwiązania grupy Elona Maska. Mimo pozytywnych opinii projekt nie wszedł w etap realizacji. Dla porządku przedstawiono tę koncepcję na krajowej konferencji [3]. W następnych latach zrealizowano szereg teoretycznych opracowań dotyczących warunków dla systemu transportowego poza kontynentem Europejskim. Do pierwotnej koncepcji wrócono przygotowując koncepcję systemu transportowego dla warunków marsjańskich [4]. Po ponownym zwróceniu się światowych agencji kosmicznych w kierunku Księżyca przedstawiono kolejną koncepcję tego systemu dla tego ciała niebieskiego [5]. Dyskusja jaka wywiązała się po prezentacji na konferencji w Dubaju wykazała przydatność koncepcji w ewentualnych przyszłych zakładach produkcyjnych na innych planetach, księżycach czy

nawet asteroidach. W pracy niniejszej przedstawia się ogólne prace koncepcyjne związane z systemem transportowymi poza powierzchnią Ziemi koncentrując się na programach dla Księżyca i Marsa zgodnie z przewidywaną aktywnością w najbliższych latach.

### Zarys koncepcji transportu niskociśnieniowego

Mimo iż koncepcja transportu w rurach z obniżonym ciśnieniem znana jest od ponad dwustu lat, to dopiero ostatnie 10 lat możemy określić jako znaczący postęp rozwoju tej koncepcji. W 2013 roku grupa inżynierów SpaceX i Tesli publikuje dokument Hyperloop Alpha, w którym przedstawia założenia nowego systemu transportowego. Zakłada on wykorzystanie tub z obniżonym ciśnieniem do 1hPa (prowadzonych pod ziemią lub na pylonach - rysunek 1)

jako infrastruktury. Pojazdy mają stanowić wagoniki poruszające się z prędkością 1200km/h przy wykorzystaniu zjawiska magnetycznej lewitacji. Wysoka prędkość jest uzyskana dzięki obniżeniu oporów aerodynamicznych, poprzez obniżenie ciśnienia w infrastrukturze. [1]

Równolegle do koncepcji Hyperloop na Politechnice Wrocławskiej trwają prace nad nowym, autorskim pomysłem systemu transportowego dostosowanego do warunków panujących w Polsce. Zespół ok. 20 inżynierów pod przewodnictwem Piotra Wrzeconiarza w latach 2013-2019 pisze szereg (15) prac naukowych i dyplomowych, które rozwijają koncepcję analizując opory aerodynamiczne, budowę pojazdu, budowę infrastruktury, systemy bezpieczeństwa, sterowanie ruchem, koszty, systemy za- i wyładowcze, potencjalne trasy, zasilanie systemu i wiele innych dla warunków wrocławskich, krajowych, oraz dla innych państw nie tylko europejskich. Ostatecznie zarys ogólnej koncepcji zostaje przedstawiony w pracy pt. *Koncepcja Pierwszego Polskiego Pociągu Próżniowego – 4P*. System 4P składa się z:

- taboru, który stanowi wagonik mieszczący 28 pasażerów, o układzie osi Bo'Bo' (4 osie napędzane), wyposażony w system wymiennych modułów pasażerskich lub towarowych, oraz wymienną baterię li-ion. Pojazd, korzystając z obecnych osiągnięć Kolei Dużych Prędkości, porusza się z prędko-

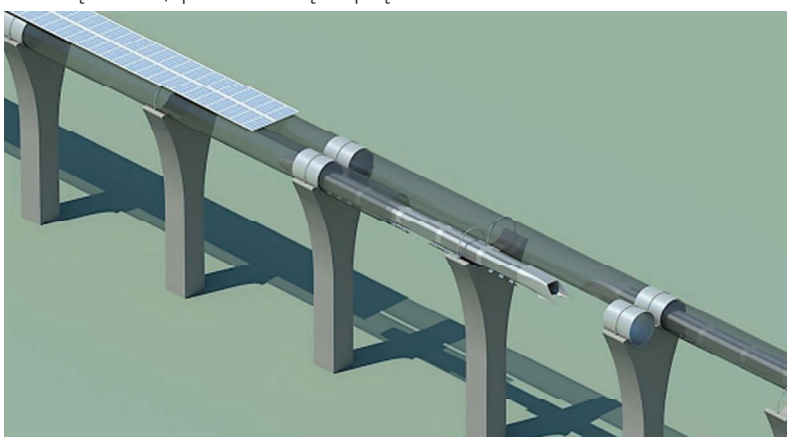
- ściami konstrukcyjną 600km/h, infrastruktury, która w odróżnieniu od Hyperloop'a, zakłada wykorzystanie połączenia kołoszyzna, a którą stanowi modułowy system prefabrykowanych tuneli kolejowych oraz systemem utrzymania obniżonego ciśnienia do ok.100 hPa (obliczenia wykazały, że jest to granica ciśnienia poniżej, której drastycznie rosną koszty zapewnienia i utrzymania ciśnienia),
- stacji i systemu załadunku – zastosowano obrotnice o średnicy 30m na końcowych odcinkach trasy, poprzedzone śluzą ciśnieniową oraz wymienne moduły pasażersko-towarowe wraz z bateriami trakcyjnymi, (zgodnie z analizami prowadzenia potoków pasażersko-towarowych w programach logistycznych) pozwoliło to na skrócenia czasu przebywania pojazdu na stacji do 30 sekund. Po przeprowadzeniu śluzowania, następuje wysunięcie modułu pasażersko-towarowego wraz z baterią i załadunek odpowiednio wcześniej przygotowanego modułu wraz z naładowaną baterią,
- systemu sterowania ruchem, pozwalającemu na zaprogramowanie w pełni autonomicznego przejazdu z odgórnie narzuconymi prędkościami na poszczególnych odcinkach, wynikającymi ze znanego wcześniej profilu trasy. Pozwala to również na oszczęd-

niejsze korzystanie z hamulców i trzystopniowego systemu hamulców. Całość trasy jest podzielona na odcinki i podobnie jak w ruchu kolejowym, są one blokowane po przejeździe pojazdu,

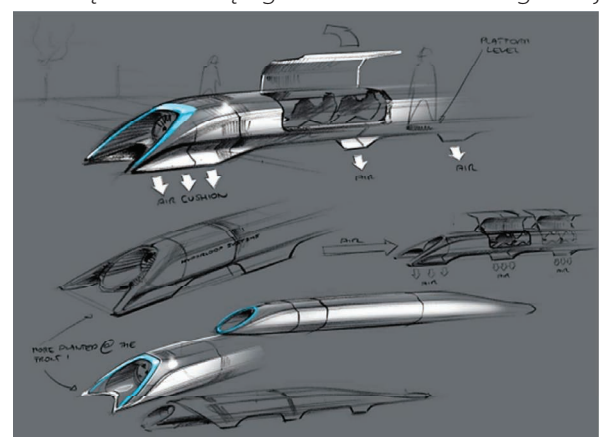
- systemów bezpieczeństwa, które powstały w wyniku przeanalizowania przez zespół 80 scenariuszy sytuacji kryzysowych i awaryjnych i zaprojektowaniu rozwiązań powszechnie znanych w lotnictwie i kolejnictwie.

System transportowy 4P jest tańszy w budowie i utrzymaniu od systemu Hyperloop'a. Koszt budowy 1 km trasy wynosi ok. 5mln\$, a koszt budowy 1 km trasy Hyperloop'a zakłada się między 9-12 mln\$. System 4P jest gotowy do wdrożenia, o czym świadczy wysoka gotowość technologiczna (9 stopień) poszczególnych podzespołów, które są obecnie powszechnie stosowane w kolejnictwie, elektromobilności i lotnictwie. System 4P jest lepszym rozwiązaniem dla warunków europejskich tj., gęstość zabudowy oraz średnia odległość trasy na poziomie ok. 400km (nie ma potrzeby stosowania olbrzymich promieni skrzywienia łuku jak w przypadku prędkości Hyperloop'a 1200km/h [3].

W 2018 roku zespół ekspertów Narodowego Centrum Badań i Rozwoju pod przewodnictwem Ziemowita Malecha na prośbę ówczesnej minister przedsiębiorczości i technologii Jadwigi Emilewicz przeprowadza analizę gotowości technologicznej



1. Infrastruktura Hyperloop pokryta panelami solarnymi [1] (Hyperloop Alpha, str. 26)



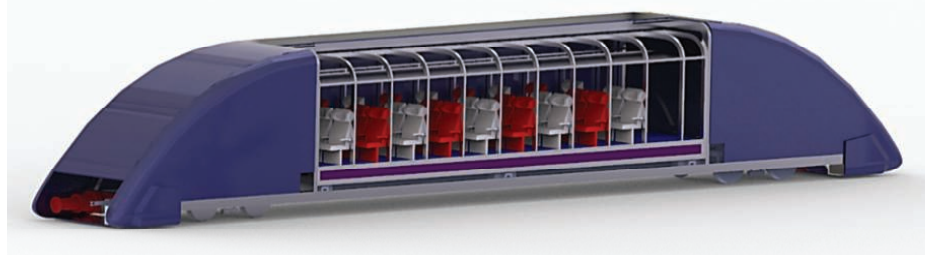
2. Koncepcja pojazdu systemu Hyperloop [1] (Hyperloop Alpha, str. 13)

systemu transportu, wykorzystującego pojazdy poruszające się z dużą prędkością w przestrzeni zamkniętej z obniżonym ciśnieniem. Efektem pracy jest ogólnodostępny raport, który weryfikując krajowy potencjał w zakresie KNC (Kolei Niskociśnieniowa), wyróżnia 7 zespołów pracujących nad rozwojem koncepcji (w tym zespół 4P), przedstawia matrycę potencjalnych komponentów systemu transportowego wraz z możliwymi konfiguracjami (na podstawie analizy informacji zebranych od zespołów) oraz przedstawia niezbędne kroki i rekomendacje w celu rozwoju KNC w Polsce [2].

W 2019 roku zespół 4P, korzystając z własnego bogatego doświadczenia (praca w sektorze *space*) zaczyna prace nad adaptacją systemu transportowego 4P dla Księżyca i Marsa. Finalnie koncepcja systemu transportowego na Marsie zostaje przedstawiona w pracy *Vacuum transport system for Mars* na konferencji International Astronautic Congress (IAC w Dubaju) w październiku 2020 roku. Natomiast na konferencji (IAC) w październiku 2021 roku zostaje przedstawiona koncepcja systemu transportowego na Księżycu w pracy *Vacuum transport system for Moon*.

## Warunki na Księżycu i Marsie

W 2019 roku w USA ogłoszono program Artemis, który ma na celu ustanowienie stałej ludzkiej obecności na Księżycu. Załoga założy bazę, w której będą testowane rozwiązania i technologie planowane do użycia w późniejszej misji na Marsa. Równocześnie prywatna firma SpaceX pracuje nad międzyplanetarnym systemem transportowym opartym na rakiecie Starship. Zachodzi więc potrzeba opracowania systemu transportowego na powierzchni Księżyca i Marsa, który pozwalałby spiąć potencjalne kolonie i miejsca występowania surowców siecią połączeń, zapewniając



3. Wizualizacja pojazdu systemu 4P wraz z modułem pasażersko-towarowym  
źródło: oprac. Własne na podstawie [9]

przepływ ludzi i towarów. W zależności od warunków panujących na Księżycu lub Marsie, system 4P po odpowiednich modyfikacjach odpowiada na tę potrzebę [6,7,8].

Przyspieszenie grawitacyjne na Księżycu wynosi  $1,6\text{m/s}^2$ . Atmosfera jest praktycznie pomijalna (ciśnienie  $3 \times 10^{-13}$  bar). Temperatura wynosi od  $-233^\circ\text{C}$  do  $123^\circ\text{C}$  ze średnią  $-23^\circ\text{C}$ . Powierzchnia Księżyca pokryta jest regolitem (85% cząsteczek mniejszych niż  $\varnothing 0,5\text{mm}$ ) – naładowanych elektrostatycznie. Występuje silne promieniowanie słoneczne, wiatr słoneczny i mirkometeority. Promieniowanie kosmiczne porównywalne do tego w przestrzeni kosmicznej. [5]

Na Marsie przyspieszenie grawitacyjne wynosi  $3,7\text{m/s}^2$ . Atmosfera jest relatywnie cienka - na powierzchni stanowi ok. 0,6% atmosfery ziemskiej (7hPa). Temperatury wahają się od  $-125^\circ\text{C}$  do  $+20^\circ\text{C}$ . Występują szkodliwe promienie kosmiczne i promieniowanie UV. Obserwuje się burze piaskowe i towarzyszące im wyładowania atmosferyczne. Bardzo słabe pole magnetyczne planety. Mars jest zróżnicowany geologicznie [4].

Można wyróżnić 3 główne problemy związane z implementacją systemu transportowego 4P na Księżycu i Marsie. Są to:

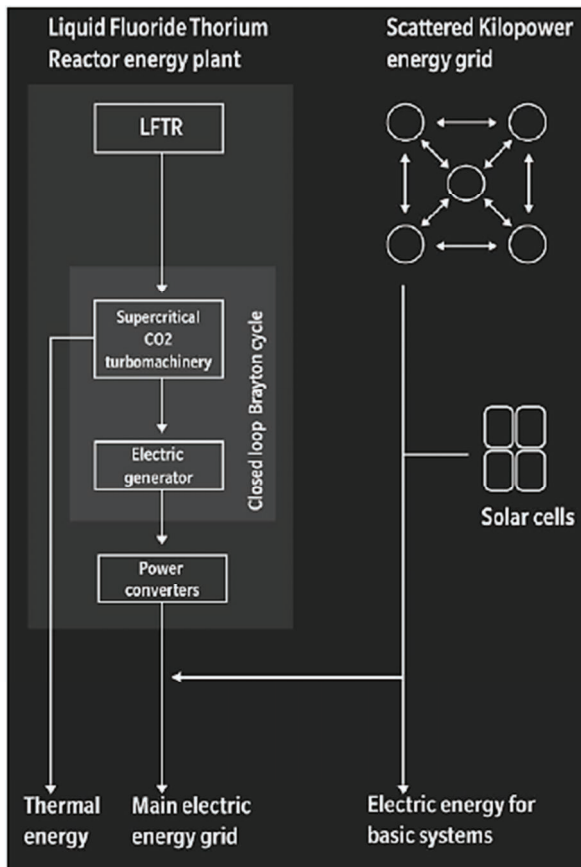
1. warunki wymagające infrastruktury chroniącej przed promieniowaniem, pyłem oraz w celu utrzymania założonego ciśnienia,
2. transport i wytwarzanie części systemu, w początkowych stadiach implementacji systemu należy przetransportować

wszystkie niezbędne elementy oraz maszyny do wytwarzania komponentów systemu już na miejscu,

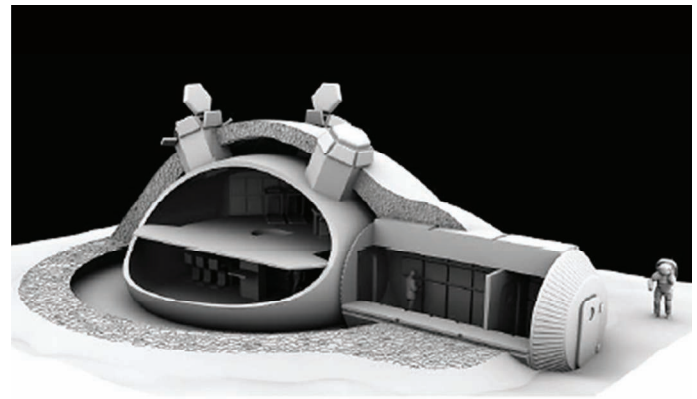
3. wytwarzanie elementów systemu in situ (ISRU), głównie zakłada się wytwarzanie komponentów typu moduły infrastruktury, stacje, architektura, szyny etc., reszta elementów drobnych tj., elektronika i komponenty wysokoprecyzyjne będą musiały zostać przetransportowane z Ziemi.

## System 4P dla Marsa

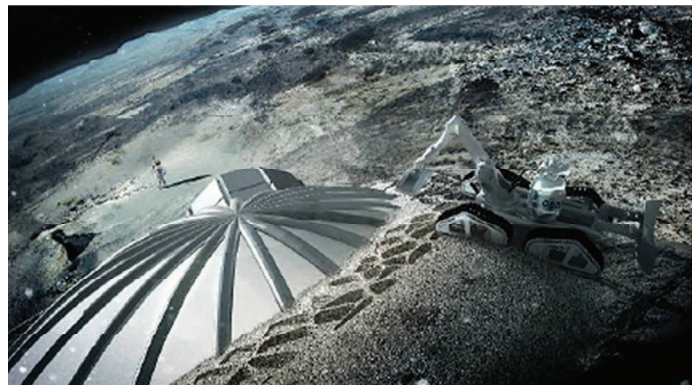
Opory ruchu, które powyżej relatywnie dużych prędkości (są wprost proporcjonalne do kwadratu prędkości) składają się głównie z oporów aerodynamicznych, są ok. 9 razy mniejsze na Marsie względem oporów ruchu na Ziemi. Przy prędkości 460km/h na Marsie (230km/h na Ziemi) możemy zaobserwować gwałtowny wzrost wartości oporów aerodynamicznych. Zjawisko to pozwala nam na osiągnięcie większych prędkości lub mniejszego niż na Ziemi zużycia energii potrzebnej do zasilania całego systemu. Infrastrukturę stanowi tunel (izolacja systemu od warunków atmosferycznych oraz stabilizacja warunków wewnątrz tj., stała temperatura i ciśnienie), który składa się ze stalowej struktury w osnowie z regolitu, którego porowatość mitygowana jest poprzez uszczelnienie modułów tworzywem sztucznym. Zakłada się 3 koncepcje budowy infrastruktury, po pierwsze w początkowym etapie zakłada się transport elementów z



4. System produkcji energii w projekcie Twardowsky [4]



5. Wizualizacja habitatu na Księżycu [5]



6. Robot wytwarzających warstwę ochronną habitatu przy wykorzystaniu spiekania regolitu za pomocą microfal [5]

Ziemi, po drugie stopniowe przechodzenie na wykorzystywanie lokalnych surowców (wraz z rozwojem kolonii), po trzecie, transport dmuchanych struktur nośnych wytwarzanych na Ziemi i pokrycie go lokalnymi materiałami. W celu wytwarzania modułów zakłada się wykorzystanie maszyn do wytwarzania addytywnego w technologii SLS (selective laser sintering) i spiekania regolitu do funkcji prefabrykatów. Bazując na bogatym doświadczeniu zespołu w projektowaniu kolonii marsjańskich (m. in. projekt Twardowsky) jako źródło energii wybrano reaktor LFTR i wspomagające go reaktory Kilopower stosowane przez NASA [4].

### System 4P dla Księżyca

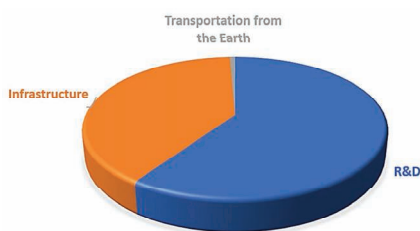
Na Księżycu z racji braku atmosfery opory aerodynamiczne są pomijalnie małe, a główną składową oporów są opory toczenia wynoszące 16kN przy zakładanej prędkości konstrukcyjnej pojazdu 600km/h. Stosując

założenia systemu 4P, przy przyspieszeniu  $0,2m/s^2$  mocy silników równej 600kW (zgodnie z tym, że każda z 4 osi pojazdu jest napędzana, możemy np. Wykorzystać silniki  $E_{max}$  268, mające znakomity stosunek mocy do masy – 117kW con., 210kW peak, 22kg) [https://emrax.com/e-motors/emrax-268/]. Znając potencjalne długości tras możemy założyć, że potrzebujemy baterii trakcyjnej, która pozwoli na 2h ciągłej pracy (1200 kWh). Infrastrukturę musi stanowić tunel w celu ochrony przed pyłem, regolitem i promieniowaniem oraz w przypadku transportu ludzi zapewnieniem odpowiednich warunków (temperatura, ciśnienie). Założono tunel podziemny, wykorzystując zjawisko spadku porowatości wraz głębokością na powierzchni Księżyca. Zjawisko to pozwala również na wykorzystanie kolein przy relatywnie niższych prędkościach i na wstępnych etapach implementacji systemu. Stacje zastosowano w końcowych etapach trasy (np. łącząc ko-

lonie lub miejsca wydobywania surowców), w których część habitacyjna musi zostać oddzielona systemem śluz od tunelu. Na stacjach wykorzystuje się znany z systemu 4P system wymiany modułów pasażersko-towarowych i/lub baterii trakcyjnych. Źródło energii systemu na stanowisku energia słoneczna i/lub reaktor, przechowywana w bateriach trakcyjnych i systemach magazynowania energii (złożonych z baterii trakcyjnych, których pierwotna pojemność spada poniżej 80% nominalnej) [5].

### In-Situ Resource Utilization (ISRU) [5]

In-Situ Resource Utilization definiowane jako zbieranie, przetwarzanie, przechowywanie i wykorzystywanie materiałów znalezionych lub wyprodukowanych na innych obiektach astronomicznych, które zastępują materiały, które w przeciwnym razie zostałyby przywiezione z Ziemi, stanowi jeden z ważniejszych elementów niezbęd-



7. Podział kosztów, które pochłonęła implementacja systemu [9]

nych do implementacji systemu 4P na Marsie i Księżycu.

Jako potencjalne źródła pozyskiwania surowców można wyróżnić:

- skały i regolit, z których można pozyskiwać metale i ceramikę oraz wytwarzać prefabrykaty,
- atmosfera, z której można pozyskiwać niezbędne gazy,
- materiały pochodzenia organicznego, stanowiące głównie żywicę oraz tworzywa sztuczne niezbędne do uszczelnienia infrastruktury.

Pozyskane surowce mogą znaleźć potencjalne zastosowanie głównie w:

- tunelach i stacjach, budowanych z prefabrykatów z regolitu pokrytych tworzywem sztucznym,
- infrastrukturze szynowej, wykorzystującej współpracę koło-szyjna, która przy relatywnie dużych prędkościach wymaga wykorzystania stali na szyny (przy niewielkich można zastosować koleiny).

Pozostałe elementy wymagające wysokiego zaawansowania (np. silniki, pompy, elektronika) należy przetransportować z Ziemi.

## Koszty

Największą część kosztów, bo aż 300mln\$, pochłoną prace badawczo-rozwojowe (R&D). Sam system podstawowy, który stanowi 11km trasa, tabor 20 pojazdów i 2 stacje końcowe, kosztuje 200mln\$. Transport niezbędnych materiałów z Ziemi (w końcowej fazie implementacji systemu wynosi ) 3mln\$. Szacuje się

koszt budowy 1km trasy na poziomie 10mln\$. [9]

## Wnioski końcowe

Przedstawiony system cechuje się odpornością (redukcja ryzyka) dzięki ograniczeniu kontaktu z zewnętrznymi czynnikami, takimi jak warunki atmosferyczne, erupcje, burze piaskowe oraz wahania temperatury.

Występują małe lub pomijalne opory aerodynamiczne oraz zmniejszone opory toczenia (mniejsza wartość g), a więc większa prędkość uzyskana mniejszym kosztem energetycznym.

System jest wysoko skalowalny, ze względu na jego modułowość można go łatwo skalować w zależności od potrzeb transportowych i stopnia rozwoju kolonii.

System jest relatywnie niskokosztowym rozwiązaniem problemu systemu transportowego. Jest bardziej ekonomiczny w budowie i eksploatacji niż inne konwencjonalne środki transportu (co jest kluczowe w warunkach kosmicznych).

Można w sposób szybki transportować ludzi i/lub towary, poprzez uzyskanie wysokiej prędkości niskim nakładem energii, co jest kluczowe w przypadku eksploatacji nowej planety (możliwość tworzenia kolonii w większych odległościach, łatwość w komunikacji z kopalniami).

Koncepcja projektu jest gotowa i przygotowana do dalszych prac i budowy prototypu. Wszystkie technologie użyte w projekcie są dobrze znane i dzięki temu stosunkowo tanie. Projekt może być odpowiedni zarówno dla długich, jak i krótkich dystansów. System po drobnych modyfikacjach może być wdrożony zarówno na Księżycu jak i na Marsie. Grupa inżynierów pracujących przy projekcie jest już przygotowana do dalszego rozwoju projektu. Jesteśmy gotowi podjąć się współpracy międzynarodowej. ◀

## Materiały źródłowe

- [1] SpaceX, Hyperloop Alpha, 2013.
- [2] Konkurs NCBiR, Analiza gotowości technologicznej systemu transportu wykorzystującego pojazdy poruszające się z dużą prędkością w przestrzeni zamkniętej z obniżonym ciśnieniem, Piotr A. Wrzecioniarz z zespołem, 2018.
- [3] Wrzecioniarz P.A., Mierzwa K., Pindel A., Koncepcja Pierwszego Polskiego Pociągu Próżniowego-4P, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport, 2019.
- [4] Wrzecioniarz P. Mierzwa K., Liśkiewicz D., Pauli M., Pezowicz P., Vacuum transport system for Mars, 71st International Astronautical Congress (IAC) – The CyberSpace Edition, Vacuum transport system for Mars, 2020.
- [5] Wrzecioniarz P. Mierzwa K., Liśkiewicz D., Pauli M., Pezowicz P., Vacuum transport system for Moon, 72st International Astronautical Congress (IAC) – The CyberSpace Edition, Vacuum transport system for Moon, 2021.
- [6] <https://pl.wikipedia.org/wiki/Hyperloop>
- [7] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Program\\_Artemis](https://pl.wikipedia.org/wiki/Program_Artemis)
- [8] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Starship#Interplanetary\\_Transport\\_System](https://pl.wikipedia.org/wiki/Starship#Interplanetary_Transport_System)
- [9] Prezentacja zespołu 4P na kongresie IAC, Vacuum transport system for Moon, P. Wrzecioniarz z zespołem, 2021.