

Marcin Rydzek

Nowe rozwiązania środków transportu na przykładzie kolei niskociśnieniowej

JEL: L92 DOI: 10.24136/atest.2019.136

Data zgłoszenia: 05.04.2019 Data akceptacji: 26.06.2019

W pracy przedstawiono przyszłościowy środek lokomocji w postaci technologii kolei niskociśnieniowej – Hyperloop. Opisano stan obecny wdrażanej technologii oraz odniesiono się do problemów związanych prędkościami w tunelu próżniowym, gdzie jednym z podstawowych jest granica Kantrowitza. Montaż turbosprężarek ma temu zapobiec, lecz taka strategia jest zbyt kosztowna. Przedstawiona technologia może stanowić alternatywę dla obecnych środków transportu.

Słowa kluczowe: kolej niskociśnieniowa, Hyperloop, Inductrack, granica Kantrowitza, liczba Macha.

Wstęp

System komunikacji powinien wyróżniać się od reszty bezpieczeństwem, niższym kosztem, odpornością na pogodę, niskimi kosztami zasilania, odpornością na trzęsienia ziemi, niskim wpływem na otoczenie, wygodą oraz przede wszystkim prędkością. Tymi cechami ma odróżniać się transport przyszłości, jakim jest kolej niskociśnieniowa (KNC). Taki rodzaj komunikacji mógłby stać się uzupełnieniem innych środków podróżowania. Lecz projekt ten obecnie jest w fazie testów i badań, ponieważ zmagają się z wieloma nurtującymi kwestiami.

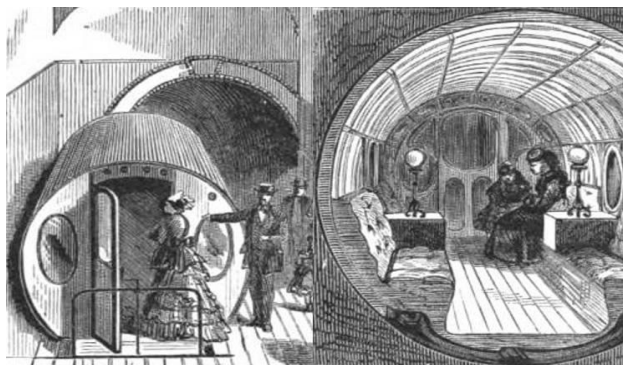


Rys. 1. Prototyp kolei niskociśnieniowej

Kolej niskociśnieniowa ma potencjalnie mnóstwo zalet, ze względu na zakładaną dużą prędkość oraz niskie koszty użytkowania. Sprawia to, że urzeczywistnienie tego pomysłu wymaga rozwiązania wielu problemów technicznych. Jednym z nich jest limit Kantrowitza, który to objawiałby się spiętrzaniem powietrza przed pojazdem przy bardzo dużej prędkości. Remedium na to zjawisko powinna być sprężarka, która zasysa powietrze sprzed pojazdu. Bez jej użycia prędkości maksymalne będą oscylować w przedziale 500-600 km/h. Wymienione problemy techniczne skłaniają do analiz i badań.

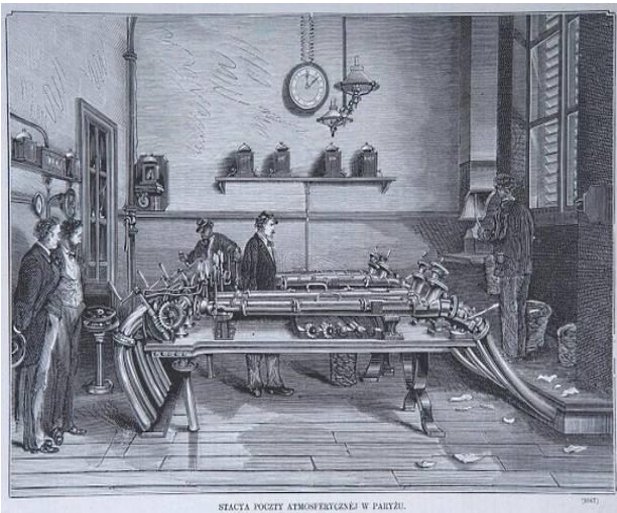
1. Historia napędu pneumatycznego

Nie jest prawdą, że to północnoafrykański miliardier, twórca Tesli, wynalazł technologię KNC – Hyperloop. Koncepcja została przez niego tylko odświeżona w 2012 r. Pierwszy projekt podróży w tubie próżniowej sięga roku 1799, kiedy to naukowiec George Medhurst wynalazł system tranzytu o napędzie pneumatycznym za pośrednictwem sieci szczelnych żeliwnych rur. Warto wspomnieć, że w latach 1870-73 działał tzw. „The Beach Pneumatic Transit” (rys.2), który był prekursorem nowojorskiego metra. Wagon poruszany był za pomocą sprężonego powietrza. Tunel miał 2,4 m średnicy oraz 95 m długości. W kapsule mogło podróżować 22 osoby. Koncepcja jednak upadła ze względu na krach giełdowy w 1873 r., choć ten środek lokomocji cieszył się dużym zainteresowaniem – w pierwszym roku funkcjonowania sprzedano ponad 400 tys. biletów.



Rys. 2. The Beach Pneumatic Transit (1870)

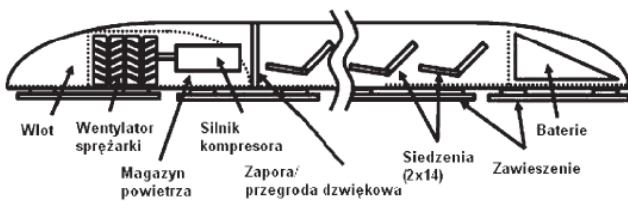
Niektóre systemy o podobnej zasadzie działania używane były do niedawna. Przykładem może być koncepcja berlińskiej poczty pneumatycznej Rohrpost o łącznej długości 400 km. Natomiast w Pradze taki rodzaj poczty był w użyciu aż do roku 2002, kiedy nastąpiło uszkodzenie instalacji przez powódź. Praska sieć miała około 55 km długości. Ciekawym rozwiązaniem były rozgałęzienia, dzięki którym można było przestawić „zwrótnicę” przekierowującą pierwszy pakiet do innej rury. Następnie zwrótnica wracała do poprzedniego ustawienia. Paczka, która miała dotrzeć do drugiej lokalizacji, musiała więc być wysłana jako pierwsza. Równocześnie w obiegu mogło być do dziesięciu kapsuł. Infrastruktura praskiej poczty była gwiazdzista, a cylindry, które w niej używano, nie przylegały ściśle do ścian rury, tylko miały z tyłu rodzaj wachlarza, który zapewniał opór powietrza. Kapsuły miały średnicę 48 mm, natomiast długość wynosiła 200 mm. Zakończony był plastikową obręczą zmniejszającą tarcie oraz kołnierzem – uszczelnieniem pozwalającym na sprężenie powietrza za kapsułą. Jednostką napędową była elektryczna pompa, która mogła obsłużyć 3 km przewodu [1].



Rys. 3. Stacja poczty atmosferycznej w Paryżu, rok 1873

2. Charakterystyka kolei niskociśnieniowej na przykładzie Hyperloop

Kolej niskociśnieniowa to system transportu wykorzystujący pojazdy poruszające się z dużą prędkością w przestrzeni zamkniętej z obniżonym ciśnieniem. Przykładem takiego środka lokomocji jest Hyperloop, który został po raz pierwszy zaprezentowany przez Elona Muska w 2012 roku. Koncepcja zakładała przewożenie pasażerów pomiędzy San Francisco a Los Angeles w Stanach Zjednoczonych. Umieszczone kapsuły w tunelu o obniżonym ciśnieniu (100 Pa) mają poruszać się z docelową prędkością ok. 1200 km/h. Pojazd będzie mógł pomieścić według różnych koncepcji między 24 a 48 osób.



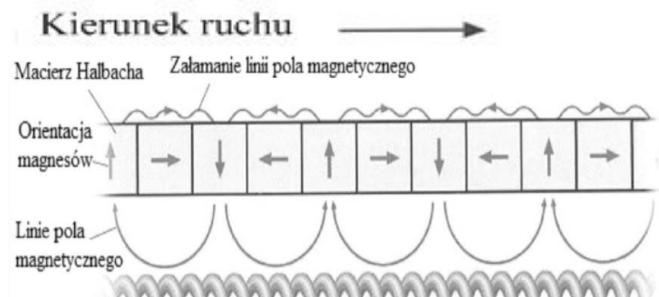
Rys. 4. Schemat kapsuły pasażerskiej (źródło E. Musk, Hyperloop Alpha)

Projekt zakłada, iż konstrukcja tuneli będzie wykonana ze stali, aby zapewnić szczelność. Ponadto połączenia między segmentami rozwiążą problem rozszerzalności cieplnej ciągu konstrukcji. Aby utrzymać środowisko niskiego ciśnienia przy wjazdach/wyjazdach ze stacji pasażerskiej, ruch pojazdów będzie się odbywał za pomocą systemu śluz. Natomiast pompy próżniowe zapewnią warunki obniżonego ciśnienia. Masa kapsuły ma wynosić ok 300 kg, co zapewnią lekkie materiały używane w lotnictwie. Szczegóły techniczne zostały opisane w kolejnym rozdziale.

3. Lewitacja magnetyczna, mechanika płynów

Odświeżona koncepcja KNC umożliwia przemieszczanie się osób lub ładunków z bardzo dużą prędkością w oparciu o zrównoważony transport. W koncepcji zastosowana będzie pasywna lewitacja magnetyczna Hyperloop System, którą opracował zespół doktora Richarda Posta. Zasada działania nawiązuje do technologii Inductrack I – optymalnej do pracy o dużych prędkościach. Wyżej wymieniony rodzaj lewitacji wykorzystuje znajdujące się pod pojazdem magnesy ułożone w macierz Halbacha (rys.5), gdzie natężenie pola magnetycznego po jednej stronie macierzy jest niwelowane, natomiast po drugiej stronie macierzy jest wzmacniane. Opracowana przez Halbacha metoda pozwala na znacznie efektywniejsze

wykorzystanie magnesów trwałych poprzez ukierunkowywanie strumienia magnetycznego.



Rys. 5. Zasada działania technologii Inductrack [2]

Wyrażenie na wartość oddziaływania dwóch położonych obok siebie magnesów można zapisać jako:

$$\mu_0 P = B^2/2 \quad (1)$$

gdzie:

- μ_0 - przenikalność magnetyczna próżni,
- P - wektor siły,
- B - remanencja (namagnesowanie).

Technologia Inductrack umożliwia uzyskanie prześwitu pomiędzy magnesami a uzwojeniami na ponad 80 mm. Rozwiązanie umożliwia ponadto uzyskanie wysokiej wartości stosunku siły unoszącej do siły ruchu postępowego. Istnieje możliwość uzyskania siły unoszenia rzędu 500 N/m [2].

4. Problem prędkości kapsuły w tunelu próżniowym

Jeśli w pobliżu nadźwiękowego przepływu wystąpi skurcz obszaru, prędkość przepływu wzrośnie, aż osiągnie lokalną prędkość dźwięku, a przepływ zostanie zablokowany. Za tą zasadą kryje się ograniczenie Kantrowitza (wzór 2), czyli maksymalna wielkość skurczu, jaki może napotkać przepływ wokół dławików, a prędkość nie może być zwiększona powyżej tego limitu, niezależnie od zmian ciśnienia. Limit Kantrowitza ma wiele zastosowań w dynamice gazu w przepływie wlotowym, w tym w silnikach odrzutowych i rakietach pracujących przy wysokich prędkościach poddźwiękowych i nadźwiękowych oraz w systemach szybkiego transportu.

$$\frac{A_{tube}}{A_{bypass}} = \frac{1}{Ma} \left\{ \frac{1 + \left[\frac{\gamma - 1}{2} \right] Ma^2}{1 + \left[\frac{\gamma - 1}{2} \right]} \right\}^{\gamma + 1/[2(\gamma - 1)]} \quad (2)$$

gdzie:

- A_{bypass} – pole przekroju poprzecznego między rurą a kapsułą,
- A_{tube} – pole przekroju poprzecznego rury,
- Ma – liczba Macha,
- γ – wykładnik adiabaty, współczynnik w r. Poissona $\left[\frac{c_p}{c_v} \right]$ – wielkość bezwymiarowa.

W dynamice gazowej granica Kantrowitza odnosi się także do teoretycznej koncepcji opisującej przepływ dławiony przy prędkościach nadźwiękowych lub bliskich nadźwiękowych. Gdy przepływ płynu ulega zmniejszeniu w obszarze, wówczas przepływ przyspiesza w celu utrzymania tego samego natężenia przepływu masowego, zgodnie z równaniem ciągłości (wzór 3). Stwierdza ono, że szybkość, z jaką masa wchodzi do układu, jest równa szybkości,

z jaką masa opuszcza układ plus nagromadzenie masy w układzie. Różniczkowa postać równania ciągłości jest następująca:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (3)$$

gdzie:

- ρ – gęstość płynu,
- t – czas,
- \mathbf{u} – pole wektorowe prędkości przepływu,
- ∇ – dywergencja pola wektorowego,
- $\rho \mathbf{u}$ – gęstość prądu masy.

Liczba Macha (wzór 4) natomiast odnosi się zarówno do obiektów poruszających się z dużą szybkością w płynie, jak i płynów płynących z dużą szybkością w tunelach, co zakłada koncepcja kolei niskociśnieniowej. Ponieważ jest to stosunek dwóch wartości o tych samych wymiarach, jest ona liczbą bezwymiarową. Z tego powodu poprawnym odczytem $M = 1$ jest „Mach jeden”, a nie – jak to często jest odczytywane – „jeden Mach”, co oznaczałoby, że Mach jest jednostką.

$$Ma = \frac{v}{a} \quad (4)$$

gdzie:

- v – prędkość pojazdu [m/s],
- a – prędkość dźwięku w płynie w danym obszarze [m/s].

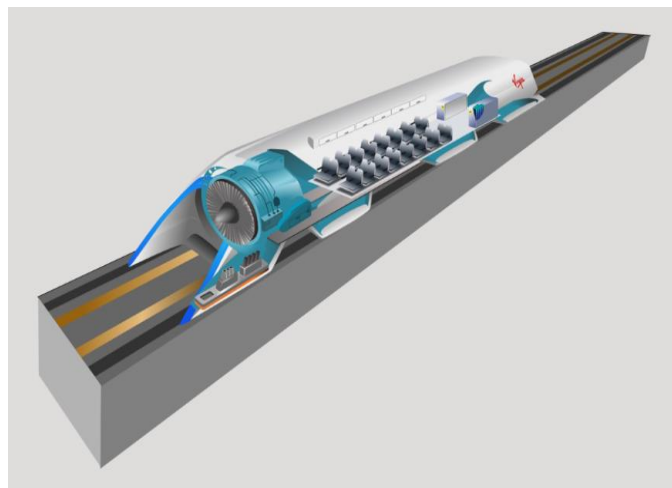
Remedium na ograniczenie prędkości jest przewidziane. Elon Musk wraz z swoją firmą SpaceX proponują zamontowanie ogromnej sprężarki na przodzie kapsuły, która przepompowywałaby powietrze za pojazd. W ten sposób rozwiązany zostałby problem z ciśnieniem i zachowywaniem się jak tłok strzykawki. Dzięki przetłaczaniu powietrza z przodu do tyłu pojazdu opór by się nie zwiększał. Dodatkowo system taki rozwiązałby inny problem - utrzymywanie pociągu nad wewnętrzną powierzchnią rury. Przy podróży z prędkością około 1200 kilometrów na godzinę problematyczne jest stworzenie systemu zawieszenia o niskim tarciu z rurą. W projekcie Hyperloopa założono, że powietrze wypompowywane z czoła pojazdu będzie częściowo wpompowywane pod pojazd. Dzięki temu nastąpiłoby odwrócenie części przepływu, co zasililoby układ zawieszenia powietrznego o niskim tarciu. Zastosowanie sprężarki pozwoliłoby ominąć limit Kantrowitza (wzór 2).

Innym ciekawym rozwiązaniem jest projekt sprężarki diagonalnej z dwoma przeciwbieżnymi wirnikami. Jest to nietypowe urządzenie, które jeszcze nigdy nie powstało. Jednakże ma ono potencjalnie przewagę nad sprężarką osiową, ponieważ ma większą powierzchnię wlotu. Ponadto nie wymaga zastosowania wlotu, który obniżałby prędkość napływu. Na początku zaprojektowano wstępną geometrię przedniej części KNC wraz z fragmentem rury. Wymiary dobrano na podstawie przybliżonych obliczeń, zakładających izentropowy przepływ wokół pojazdu oraz dokumentacji proponowanych projektów Hyperloopa. Kształt łopatek sprężarki przybliżono powierzchniami zbudowanymi ze szkieletowych. Same zaś kształty szkieletowych dobrano analizując trójkąty prędkości dla obu wirników. W następnym kroku przeprowadzono symulacje aerodynamiczną zaproponowanej geometrii. Do obliczeń stworzono zgrubną siatkę objętości skończonych ze względu na duży rozmiar obszaru obliczeniowego. W związku z tym do zamodelowania turbulencji użyto równania Spalarta-Allmarasa, ze względu na jego prostotę. Szczególną uwagę zwrócono na zmianę ciśnienia statycznego za wirnikami oraz wydatek powietrza zasysany przez sprężarkę w

stosunku do wydatku powietrza opływającego pojazd. Następnie przybliżono kształt profili aerodynamicznych łopatek trzema łukami i wykonano analizę wytrzymałościową dla jednej łopatki z zewnętrznym pierścieniem wzmacniającym. Ponadto ustawiono obciążenie siłą bezwładności związanej z ruchem obrotowym wirnika. W kolejnych iteracjach przebadano kilkanaście geometrii, poszukując tej która wytrzyma działające na ustrój obciążenie. Po zakończeniu tego etapu do znalezionej geometrii przyłożono dodatkowo ciśnienie, które miało przybliżyć działanie sił aerodynamicznych. Po sporządzeniu analizy wykonalności, wykonano symulacje aerodynamiczną Hyperloopa z klasyczną osiową sprężarką w celu porównania parametrów obu konstrukcji. Kierowano się głównie obliczoną liczbą Macha przed pojazdem oraz wydatkiem masowym powietrza zasysanego przez sprężarkę.

5. Zalety KNC, analiza problemów

Przedstawiona technologia może stanowić alternatywę dla obecnych środków transportu, ponieważ istnieje możliwość znaczącego obniżenia kosztów transportu, w tym kosztów inwestycyjnych, utrzymaniowych oraz środowiskowych przy jednoczesnym zwiększeniu prędkości eksploatacyjnej. Obniżone ciśnienie pozwoli ograniczyć nakłady energetyczne związane z koniecznością pokonania sił oporu. Kolejną zaletą jest odseparowanie od środowiska zewnętrznego, co wyeliminuje możliwość kolizji z innymi pojazdami. W Polsce rozwój koncepcji KNC zintensyfikuje różne segmenty technologii składowych – próżniowe, tunelowe czy napędowe.



Rys. 6. Wizualizacja koncepcji Hyperloop (źródło dnaindia.com)

Jednak na obecnym etapie testów i analiz, trzeba zastanowić się nad kwestiami dotyczącymi odbioru dużej ilości ciepła w środowisku o obniżonym ciśnieniu, utrzymaniu próżni w tunelu o długości kilkuset kilometrów, gwarancją szczelności pojazdu, dostarczeniem energii do zasilania pojazdu, budową rozjazdów umożliwiającym zjazd kapsuły, odpowiednią konstrukcją przystanków, zapewnieniem dużej przepustowości kolei czy pracami serwisowymi [3]. Warto także zastanowić się nad obejściem granicy Kantrowitza w sposób tańszy, czyli bez montażu turbosprężarek. Próba autorskiego uzupełnienia definicji powyższego ograniczenia prędkości dla kolei niskociśnieniowej może okazać się jako remedium na największy problem techniczny, jakim jest limit Kantrowitza. Przeprowadzone badania i analizy pozwolą odpowiedzieć na zdefiniowany dylemat.

Podsumowanie

Wydaje się, iż kolej niskociśnieniowa jest ciekawym i potrzebnym projektem, który trzeba wdrożyć. Wzrost znaczenia mobilności

we współczesnych procesach społeczno – gospodarczych wymaga zapewnienia sprawności i efektywności przemieszczania. Powyższe argumenty dają asumpt do analiz oraz dalszych testów systemu, który bezpiecznie przeniesie prędkości samolotu na poziom gruntu. Czas podróży zmieni się z godzin na minuty, natomiast cała technologia będzie skonsolidowana siecią tuneli o niskim ciśnieniu. Transport szybki jak lotniczy i tani jak drogowy zapewne odmieni i usprawni mobilność. Warto ponadto zastanowić się nad kwestią odpowiedniego stworzenia warunków wewnątrz tunelu próżniowego, by móc zwiększyć optymalną prędkość bez zastosowania rozwiązań w postaci sprężarki.

To nie jest wymyślony system, lecz projekt, który z powodzeniem można wdrożyć przy użyciu już istniejącej technologii. Kiedy? Najwcześniej za 10 lat.

Bibliografia

1. Retronauta.pl *Hyperloop wiktoriańskich czasów (1863-1874)* (dostęp 07.03.2018)
2. Maryniak J., Sibilski K., *Mechanika w Lotnictwie ML-XIV, Tom II*, PTMTS, Warszawa, 2012
3. Malecha Z, Krukowski P., Pyrka P., Skrzynecki K., Pryciński P., Palka M.: *Analiza gotowości technologicznej systemu transportu*

wykorzystującego pojazdy poruszające się z dużą prędkością w przestrzeni zamkniętej z obniżonym ciśnieniem. Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, Warszawa, 2018

4. Pierwocha P.: *Projekt sprężarki do pojazdu HYPERLOOP*, Praca dyplomowa, Politechnika Warszawska, 2017

The low pressure railway – a new solutions of the means of transport

The paper presents a forward-looking means of transport in the form of hyperloop technology. The paper describe current state of the implemented technology and refers to the problems related to speeds in a vacuum tunnel. The basic problem related to speed is the limit of Kantrowitz. The presented technology can be an alternative to the current means of transport.

Keywords: low-pressure railway, Hyperloop, Inductrack, limit of Kantrowitz, Mach number.

Autor:

mgr **Marcin Rydzek** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu, Wydział Transportu i Elektrotechniki