

Piotr A. Wrzecionarz, Karol Mierzwa, Aleksandra Pindel

Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Pojazdów

KONCEPCJA PIERWSZEGO POLSKIEGO POCIĄGU PRÓŻNIOWEGO - 4P

Rękopis dostarczono, lipiec 2019

Streszczenie: W pracy przedstawiono ogólną koncepcję Pierwszego Polskiego Pociągu Próżniowego, zwanego w skrócie 4P. Na tle historycznych rozwiązań scharakteryzowano znane koncepcje dotyczące systemu Hyperloop oraz własny autorski pomysł, dostosowany do warunków panujących w Polsce. Bazując na wcześniejszych własnych pracach dotyczących rozwoju elektromobilności, przedstawiono informacje dotyczące systemu 4P, wybrane z 15 opracowań zrealizowanych w latach 2013–2019, opisujących zagadnienia takie jak: tabor, infrastruktura, stacje, systemy za- i wyładownicze, systemy bezpieczeństwa, koszty, potencjalne trasy w Polsce. Porównano system Hyperloop z systemem 4P, wskazując wyższość tego ostatniego dla warunków krajowych.

Słowa kluczowe: Pierwszy Polski Pociąg Próżniowy, Hyperloop, Koleje Niskociśnieniowe

1. WPROWADZENIE

Kolej i lotnictwo do pewnego czasu rozwijały się niejako oddzielnie. Przyjmuje się, że historyczne rozwiązanie parowozu *Rocket* powstało w 1829 roku (George Stephenson). Kolej rozwijała się nieprzerwanie, przyczyniając się w znaczący sposób do pierwszej rewolucji przemysłowej, a później wpływając na istotną zmianę w transporcie na całym świecie. Obecnie maksymalna prędkość w regularnych przewozach Kolei Dużych Prędkości wynosi 350 km/h (rekord – 574,79 km/h TGV 2007 r., a dla lewitacji magnetycznej 603 km/h, Maglev 2015 r.).

Lotnictwo zaczęło rozwijać się około 70 lat później. Pierwszy kontrolowany lot samolotem miał miejsce w roku 1903 (bracia Wright). Po kolejnych latach nieustannego wzrostu, przewozy lotnicze objęły rocznie około 46 mln pasażerów w Polsce (dane za rok 2018). Samoloty wzbijały się coraz wyżej, aż do obszaru znacznie obniżonego ciśnienia (ok. 230 hPa na wysokości 11 000 m).

Po kolejnych stu latach, powstała idea połączenia obu środków transportu w systemie Kolei Niskociśnieniowych, w skrócie KNC. Istotnym impulsem rozwojowym okazały się kolejne koncepcje Elona Musk'a, tym razem związane z systemem Hyperloop, gdzie połączono zalety transportu lotniczego – wysoka prędkość ponad 1000 km/h, osiągana w środowisku o obniżonym ciśnieniu, gdyż takie panuje na wysokości przelotowej samolotu,

z zaletami transportu kolejowego – dojazd do centrum, łatwość załadunku, powiązanie z lądem, co eliminuje czynnik psychologiczny związany z występowaniem lęku podczas lotu.

W środowisku fizyków i inżynierów Uniwersytetu Wrocławskiego oraz Politechniki Wrocławskiej zagadnienie podróży w tunelach z obniżonym ciśnieniem dyskutowane było od lat 80-tych ubiegłego wieku.

Po roku 2013, który można przyjąć za początek kolejnej rewolucji transportowej, powstaje szereg firm prywatnych (*Virgin Hyperloop One*, *Hyperloop Transportation Technologies*). Firma Elona Musk’a SpaceX (przemysł kosmiczny) organizuje kilka edycji konkursu *SpaceX – Hyperloop Pod Competition* dla drużyn z całego świata. Również w Polsce powstaje siedem zespołów. Ich charakterystykę w ujęciu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju można znaleźć w opracowaniu *Analiza gotowości technologicznej systemu transportu wykorzystującego pojazdy poruszające się z dużą prędkością w przestrzeni zamkniętej z obniżonym ciśnieniem* (Warszawa, czerwiec 2018 r.) [15].

Zespół Politechniki Wrocławskiej rozpoczął intensywne prace projektowe, począwszy od roku 2013 kiedy to pierwszy z autorów niniejszego tekstu przedstawił własną koncepcję zbudowania – jak się wydaje – systemu adekwatnego do warunków krajowych. Od tego czasu powstało kilkanaście opracowań rozwijających w szczególności koncepcję Pierwszego Polskiego Pociągu Próżniowego – 4P (*FOR PEOPLE*). Skrótowemu przedstawieniu tych rozwiązań poświęcona jest niniejsza praca.

2. ROZWÓJ KOLEI NISKOCIŚNIENIOWYCH

2.1. RYS HISTORYCZNY

Koncepcja transportu próżniowego nie jest tak nowa jak się powszechnie uważa. Wydaje się, że początki transportu próżniowego sięgają roku 1799, gdy George Medhurst opublikował patent dotyczący transportu dóbr w rurach. W 1812 roku napisał książkę, w której przedstawił ideę transportu ludzi i towarów w hermetycznych rurach za pomocą napędu powietrznego. Na początku XIX wieku rozwijano również podobną koncepcję, zwaną *koleją atmosferyczną*, która zakładała wykorzystanie dodatkowej pneumatycznej rury do napędu. W latach 1844 -1854 w Dublinie działała *Dalkey Atmospheric Railway*, uznawana za pierwszą tego typu kolej na świecie. W 1864 przez dokładnie rok, w Londynie działała *kolej pneumatyczna Crystal Palace*. Wagoniki napędzane były przez wentylatory zasilane przez silnik parowy. W latach 1870 – 1873 w Nowym Jorku działała *kolej pneumatyczna Beach Pneumatic Transit*. Kapsuła poruszała się na zasadzie różnicy ciśnień – niższe ciśnienie z przodu powodowało „zasysanie” pojazdu. W 1910 roku Robert Goddard przedstawił koncepcję transportu próżniowego, która była bardzo zbliżona do obecnej koncepcji *Hyperloop’a*. W 1981 roku fizyk Gerard K. O’Neill napisał książkę *2081: A Hopeful View of the Human Future*, w której opisał transport wykorzystujący tunel do obniżenia ciśnienia, a więc oporów aerodynamicznych, oraz wykorzystania lewitacji magnetycznej. Zbudował również prototyp o nazwie *mass driver*. Na przełomie wieków w Szwajcarii powsta-

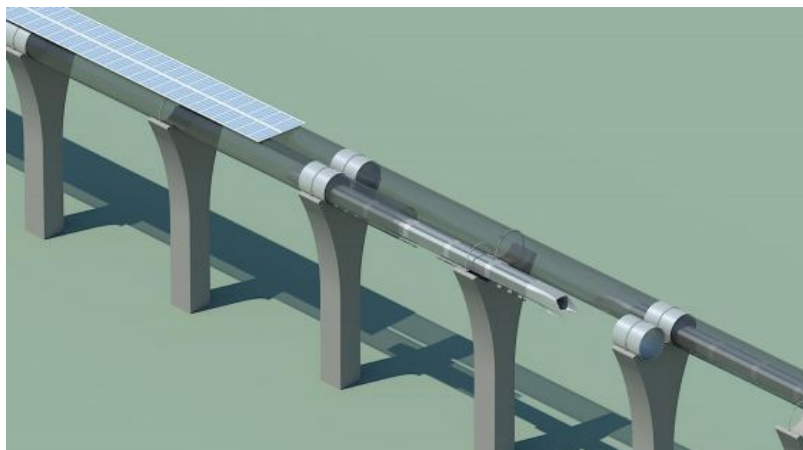
je koncepcja *Swissmetro*, zakładająca poruszanie się wagonika z prędkością rzędu 500 km/h w środowisku o obniżonym ciśnieniu. Mimo, że na początku XXI wieku wydane zostają odpowiednie pozwolenia i zgody, po analizie studiów wykonalności, postanowiono odstąpić od budowy tego rozwiązania. W 1997 Daryl Oster założył *ET3 Global Alliance (ET3)*, którego celem była budowa międzykontynentalnego systemu transportowego, opierającego się na wagoniku poruszającym się dzięki magnetycznej lewitacji w środowisku o ograniczonych oporach ruchu. W 2013 Elon Musk prezentuje dokument *Hyperloop Alpha*, opracowany przez połączony zespół inżynierów Tesli i SpaceX. Jak twierdził, do koncepcji skłoniły go plany budowy Kolei Dużych Prędkości (KDP) w Kalifornii, które miały trwać ok. 20 lat i pochłonąć 68,4 mld dolarów. W dokumencie przedstawiono projekt wagonika, infrastruktury, potencjalne trasy w Kalifornii i przybliżone koszty budowy, które były znacznie niższe od kwot niezbędnych do zbudowania KDP. Należy podkreślić podejście samego Musk'a do Hyperloop'a – ma on za zadanie rozpocząć rewolucję i zachęcić innych do rozwijania koncepcji, gdyż sam jest bardziej pochłonięty pracą w Tesli i SpaceX. Dlatego też w 2015 roku organizuje konkurs *Hyperloop Pod Competition* dla drużyn studenckich z całego świata, które miały za zadanie opracować koncepcję i zbudować prototyp kapsuły w odpowiedniej skali, a następnie testować je na torze testowym zbudowanym przez SpaceX. Konkurs miał dwie edycje, największe sukcesy odnoszą drużyny MIT Hyperloop (USA), Delft Hyperloop (Holandia) i WARR Hyperloop (Niemcy). W drugiej edycji konkursu bierze również udział polska drużyna Hyper Poland. Zespół 4P nie startował w tych zawodach, gdyż w tym czasie intensywnie rozwijał zagadnienie elektromobilności i autonomii ruchu. Prace trwały jednak nieustannie. Nie były one publikowane, gdyż wg autorów zawierały wiele pionierskich idei, które traktowano jako poufne.

2.2. PIERWOTNA KONCEPCJA HYPERLOOP

Koncepcja Hyperloop została przedstawiona w dokumencie *Hyperloop Alpha* [3]. Należy zaznaczyć, że był to dokument o charakterze „open source”, mający zachęcić do rozwijania idei. Różne szczegółowe koncepcje mogą się różnić między sobą w zależności od firmy czy drużyny studenckiej. Zasadnicza idea opiera się na ruchu kapsuły pasażerskiej lub towarowej z maksymalną prędkością rzędu 1200 km/h z wykorzystaniem magnetycznej lewitacji (redukcja oporów toczenia), w środowisku o obniżonym ciśnieniu do 1 hPa (obniżenie oporów aerodynamicznych). Jak łatwo zauważyć Hyperloop łączy w sobie cechy pociągu – możliwość stacji w centrum miasta, odległości typowe dla KDP oraz samolotu – wysokie prędkości. Dodatkowo pierwotna koncepcja zapewnia niezależność od pogody, brak kolizji z istniejącą infrastrukturą (wykorzystanie pylonów), niskie zużycie energii, możliwość magazynowania energii (wykorzystanie paneli słonecznych) oraz całkowitą autonomię ruchu. System składa się z infrastruktury, taboru, napędu oraz stacji.

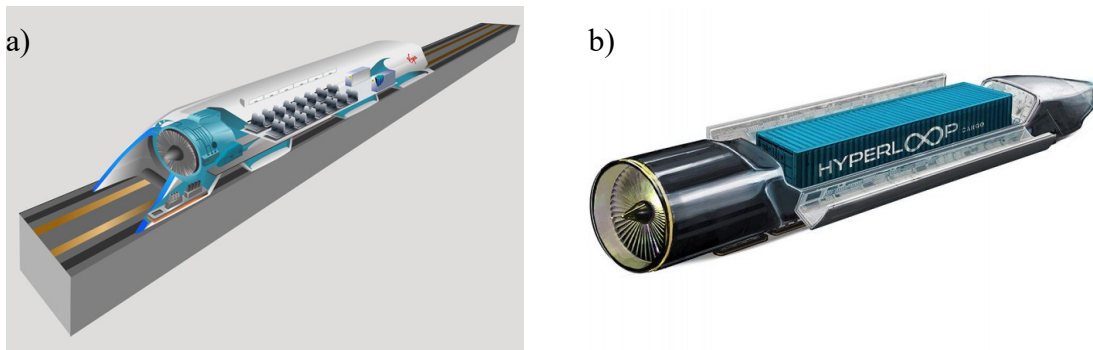
Infrastruktura. Infrastruktura ma za zadanie zapewnić obniżone ciśnienie w celu redukcji oporów aerodynamicznych. Zapewnia również prowadzenie taboru. Składa się z modułu o przekroju zbliżonym do kołowego, wykonanego ze szczelnego, pozwalającego na utrzymanie niskiego ciśnienia, materiału (planuje się użycie stali, ale rozważane są również tworzywa sztuczne, kompozyty oraz materiał przezroczysty). Całość prowadzona jest na pylonach, w celu zmniejszenia ingerencji w obecną zabudowę oraz większej izolacji infrastruktury, a także mniejszych opłat za korzystanie z gruntu. Całość pokryta jest

panelami słonecznymi, które mają zapewnić część energii niezbędnej do zasilania systemu. Przewidziano dwie wersje – pasażerską, która będzie miała mniejszą średnicę, a więc mniejsze opory aerodynamiczne kapsuły lecz zwiększoną niewygodę (podróżowanie niemalże w pozycji leżącej) oraz towarową, która będzie większa. Przewiduje się również prowadzenie trasy tunelami, co będzie zdeterminowane ukształtowaniem terenu w planowanej trasie Los Angeles – San Francisco, biegnącej częściowo przez tereny góryste. Na rysunku 1 przedstawiono koncepcję infrastruktury systemu Hyperloop.



Rys. 1. Koncepcja infrastruktury systemu Hyperloop [3]

Tabor. Tabor stanowi kapsuła wyposażona w silnik liniowy, który współpracując z elementami napędu umieszczonymi w infrastrukturze, zapewnia ruch, wykorzystując zjawisko magnetycznej lewitacji. Napęd zasilany jest bateriami umieszczonymi na pokładzie. Przy dużych prędkościach może wystąpić zjawisko limitu Kantrowitza – powietrze sprzed kapsuły nie będzie odpowiednio szybko jej opływać i spowoduje wzrost oporów – w tym celu planuje się umieszczanie z przodu wentylatora, który ma zapewnić skuteczny przepływ powietrza. Dąży się do redukcji współczynnika oporu aerodynamicznego C_x oraz redukcji przekroju poprzecznego, który w znacznym stopniu wpływa na opory aerodynamiczne. Na rysunku 2 przedstawiono wizualizacje kapsuł pasażerskiej i towarowej.



Rys. 2. Wizualizacje kapsuł: a) pasażerskiej, b) towarowej [17][18]

Napęd. Napęd składa się z dwóch zasadniczych komponentów. Statora umieszczonego miejscowo w infrastrukturze oraz rotora (silnik liniowy) w kapsule. Rotor zapewnia ruch kapsuły na skutek przyciągania i odpychania biegunów magnesowych (zapewniają ruch, hamowanie oraz prowadzenie pojazdu). Przewiduje się również podwozie kołowe wykorzystywane przy małych prędkościach lub przy pracach manewrowych. Zasilanie silnika liniowego planuje się za pomocą pakietu baterii umieszczonego na pokładzie.

Stacje. Dzięki stosunkowo niewielkim wymiarom systemu Hyperloop, stacje mogą być umieszczone w centrach miast, charakteryzujących się zwartą zabudową. Na stacjach wykorzystuje się śluzy ciśnieniowe. Eliminują długi czas odprawy, typowy dla porów lotniczych, a zapewniają krótki czas, typowy dla dworców kolejowych.

Koszty. W tabeli 1 przedstawiono zestawienie kosztów, które zostały obliczone dla trasy Los Angeles – San Francisco i przedstawione w dokumencie [3]. Wyróżniono koszt kapsuły i 1 kilometra infrastruktury w wersji towarowej i pasażerskiej. Nie uwzględniono natomiast kosztów drążenia tunelu, który przewiduje się wyliczać wg wzoru $l \times 31$ [mln \$], gdzie l – długość tunelu w kilometrach.

Tab. 1

Zestawienie kosztów systemu Hyperloop [5]

Koszt kapsuły pasażerskiej	1,3 mln \$
Koszt kapsuły towarowej	1,5 mln \$
Koszt infrastruktury pasażerskiej [1 km]	8,6 mln \$
Koszt infrastruktury towarowej [1 km]	11,25 mln \$

2.3. KONCEPCJA PIERWSZEGO POLSKIEGO POCIĄGU PRÓŻNIOWEGO

W 2013 roku przez Piotra Wrzecioniarza zostaje po raz pierwszy publicznie przedstawiona, w zamkniętym gronie, koncepcja transportu próżniowego dla warunków polskich. Zakłada się zbudowanie systemu znacznie tańszego, prostszego do wdrożenia i eksploatacji oraz bardziej technologicznie odpowiedniego do warunków krajowych, gdzie trasy przejazdu będą znacznie krótsze i w zasadzie będą się mieścić w odległościach 200 – 400 km. Biorąc pod uwagę czas niezbędny na rozpędzanie i hamowanie, założone prędkości powinny być mniejsze, co spowoduje spadek cen budowy kapsuły i infrastruktury. Polski Hyperloop z założenia ma być znacznie tańszy od amerykańskiego. Powstaje kilkanaście utajnionych prac dyplomowych, między innymi [2], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [13], [14], w których analizowane są poszczególne elementy systemu, o autorskiej nazwie Pierwszy Polski Pociąg Próżniowy (4P – *FOR PEOPLE*). Również kilka prac [11], [12] poświęconych jest koncepcji Hyperloop'a w Indiach, a więc w warunkach odmiennych od polskich (duże potoki pasażerskie, większe odległości, większe fundusze). Po około pięciu latach prac, po przeprowadzaniu analiz i obliczeń, wyłania się spójna koncepcja systemu 4P. Zakłada on poruszanie się wagonika z pasażerami lub towarami, z maksymalną prędkością rzędu 600 km/h, za pomocą układu koło-szyna, w środowisku o obniżonym ciśnieniu.

niu do ok. 100 hPa. Infrastrukturę stanowi nawierzchnia kolejowa i szczelna obudowa lub tunel, utrzymujący założone ciśnienie. Prędkość podyktowana jest odległościami typowymi dla Polski oraz obecnymi osiągnięciami Kolei Dużych Prędkości (zarówno KDP I 200-250 km/h i KDP II 300-350 km/h). Założone ciśnienie jest wystarczającym do osiągnięcia założonej prędkości, a zarazem znacznie łatwiejsze i tańsze w utrzymaniu niż ciśnienie niższe. Cały system 4P składa się z taboru, który stanowi wagonik z pasażerami lub towarami; infrastruktury, do której należą, nawierzchnia kolejowa, tunel, utrzymujący założone ciśnienie oraz systemu śluz i pomp ciśnieniowych; systemów stacji i załadunków (odpowiednio przystosowane moduły pasażerskie lub towarowe); systemów sterowania ruchem; systemów bezpieczeństwa.

Infrastruktura. Infrastruktura składa się z dwóch zasadniczych komponentów – nawierzchni kolejowej oraz tunelu. Wykorzystanie nawierzchni kolejowej wynika z gotowości technologicznej oraz stopnia zaawansowania Kolei Dużych Prędkości. Obecnie pociągi poruszają się z najwyższą prędkością eksploatacyjną 350 km/h, natomiast podczas testów przekraczają 400 i 500 km/h. Tabor KDP jest relatywnie ciężki i porusza się w ciśnieniu atmosferycznym, natomiast w koncepcji 4P pojazd nie przekracza 20 ton i porusza się w środowisku o ok. 10-krotnie mniejszym ciśnieniu niż ciśnienie atmosferyczne. Szczelna obudowa lub tunel składa się z betonu i zbrojenia oraz dodatku uszczelniającego z tworzywa sztucznego. Powoduje to wysoką gotowość technologiczną, łatwość i szybkość wdrożenia oraz zapewnia znacznie niższe koszty niż infrastruktura KDP, autostrady czy infrastruktura w koncepcji Hyperloop, co zestawiono w dalszej części opracowania.

Tabor. Pojazd składa się z układu napędowego, trakcji, układu hamulcowego, zawieszenia, podwozia i nadwozia. Założono koncepcję zbliżoną do pojazdów szynowych tj., na podwoziu składają się dwa wózki dwuosiove; każda z osi napędzana przez silniki trakcyjne (układ Bo'Bo'). Koncepcja zakłada trakcję alternatywną – zasilania pakietem baterii lub zasilanie przy użyciu pantografu/trzeciej szyny. Układ hamulcowy składa się z trzech hamulców: pierwszy zakłada hamowanie prądowe w normalnej eksploatacji; drugi hamowanie cierne klockowe; trzecim jest hamulec elektromagnetyczny wykorzystujący jako parę cierną układ płoza-szyna. Zawieszenie składa się z dwóch stopni: pierwszy zakłada odsprężynowanie układów biegowych na wózkach za pomocą sprężyn; w drugim stopniu założono wykorzystanie sprężyn pneumatycznych pomiędzy nadwoziem i podwoziem. Pozostałe elementy to rama; urządzenia pociągowo-zderzne; pudło; moduły wymienne pasażerskie lub towarowe.

System załadunku i stacji. Dzięki niewielkim wymiarom infrastruktury i taboru stacja może być umiejscowiona w centrum miasta, nawet w podziemiach galerii handlowych. Zaprojektowano stacje przelotowe i końcowe. Potoki pasażerskie, jak i czynności na stacjach, prowadzone są w sposób automatyczny. Opracowany system załadunku w znaczny stopniu skraca czas niezbędny do tej czynności.

Systemy sterowania ruchem. Założono wykorzystanie systemów sterowania ruchem kolejowym w KDP oraz sterowania ruchem lotniczym. Planuje się wykorzystać samoczynną blokadę liniową (SBL), pozwalającą na zachowanie bezpiecznych odległości między pojazdami, co jest niezwykle ważne przy zamkniętej infrastrukturze i wysokich prędkościach. Pokonywane przez pojazd trasy będą znane dlatego założono automatyzację ruchu. Znajomość profilu trasy pozwoli na minimalizację energii traconej na konwencjonalne hamowanie przy użyciu pary ciernej, gdyż będzie można wykorzystać hamowanie rekuperacyjne.

Systemy bezpieczeństwa. System transportu próżniowego jest koncepcją nową dlatego zasadnie budzi obawy. Zespół 4P opracował szereg systemów bezpieczeństwa, związanych z bezpieczeństwem kapsuły, infrastruktury oraz związanym z zagrożeniami z zewnątrz i zagrożeniami katastroficznymi. Wzorowano się na systemach stosowanych lotnictwie, kolejnictwie, a także pojazdach samochodowych.

3. WYBRANE ZAGADNIENIA SYSTEMU 4P

3.1. ANALIZA OPORÓW

Na opór całkowity składa się – opór aerodynamiczny i opór ruchu koła łożyskowanego (uwzględnia opór toczenia koła po szynie, opór w łożyskach tocznych oraz opór spinu i opór uderów torowych). W tabeli 2 zestawiono podstawowe parametry przyjęte do obliczeń. Podano: masę pojazdu, przekrój poprzeczny, współczynnik oporów aerodynamicznych C_x [1], gęstość powietrza, ciśnienie powietrza, obciążenie osi (o ile występują), współczynnik an do obliczenia oporów toczenia oraz liczba osi.

Tab. 2

Zestawienie współczynników niezbędnych do analizy oporów

	Kapsuła 4P	Lokomotywa Siemens	Hyperloop
masa [t]	20	86	15
przekrój poprzeczny [m ²]	5,72	11	1,4
C_x	0,3	0,4	0,2
q gęstość powietrza [kg/m ³]	0,12	1,21	0,0001
ciśnienie [hPa]	101,3	1013	1
obciążenie osi [kN]	50	215	-
an [N/kN]	2	2	-
liczba osi	4	4	-

W tabeli 2 porównano trzy środki transportu – projektowany pojazd 4P, lokomotywę Siemens, która osiągnęła prędkość 357 km/h i dla której są znane współczynniki oraz system Hyperloop. POD Hyperloop porusza się za pomocą lewitacji magnetycznej dlatego nie dotyczą go opory toczenia. Pojazd 4P porusza się w środowisku, w którym występuje 10% ciśnienia atmosferycznego, czyli ok. 101,3 hPa; lokomotywa porusza się w środowisku atmosferycznym, a Hyperloop w środowisku, w którym ciśnienie wynosi 1% ciśnienia atmosferycznego czyli ok. 1 hPa. Do analizy przyjęto temperaturę powietrza wynoszącą 20°C (293 K).

Gęstość powietrza q wyliczono z zależności (1)

$$q = \frac{p}{2,868T} \quad (1)$$

gdzie:

p – ciśnienie [hPa],
 T – temperatura [K].

Znając wartości tych współczynników możemy obliczyć opór aerodynamiczny ze wzoru (2)

$$W_A = \frac{C_x q A V^2}{2} \quad (2)$$

gdzie:

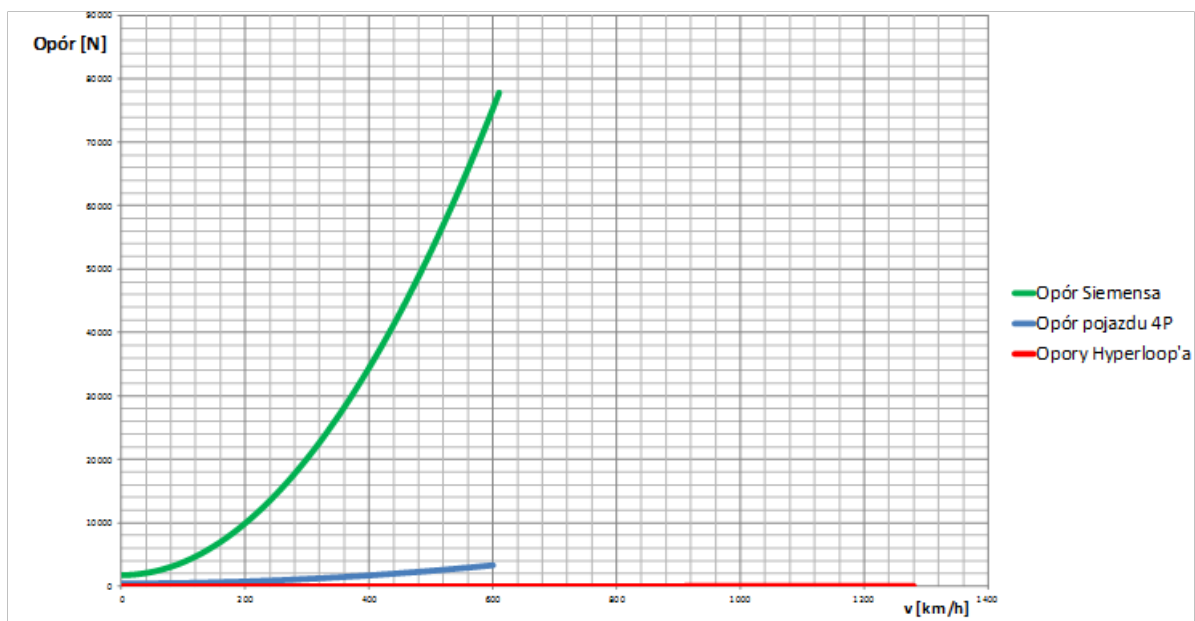
C_x – współczynnik oporu aerodynamicznego,
 q – gęstość powietrza [kg/m^3],
 A – przekrój poprzeczny [m^2],
 V – prędkość [m/s].

opór toczenia koła łożyskowanego ze wzoru (3)

$$W_t = a_n Q \quad (3)$$

gdzie:

a_n – współczynnik (2-3) [N/kN],
 Q – nacisk osi [kN].



Rys. 3. Zależność oporów ruchu od prędkości dla trzech wybranych pojazdów [5]

Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 3. Analizując krzywe oporów, można stwierdzić, że opór dla kolei konwencjonalnej, przy prędkości 600 km/h, jest znacznie (8 razy) większy od oporu pojazdu 4P i prawie 9 razy większy od oporu Hyperloop'a. Co prawda, opory kolei konwencjonalnej są stricte teoretyczne powyżej prędkości ok. 400 km/h, niemniej nawet dla prędkości 400 km/h opory ruchu w środowisku o obniżonym ciśnieniu są znacznie mniejsze. Między krzywymi oporów 4P i Hyperloop'a nie ma dużej

różnicy, za to jest duża różnica jeśli chodzi o koszty utworzenia i utrzymania ciśnienia rzędu 1 hPa oraz 100 hPa. Uzasadnia to wybór ciśnienia dla koncepcji 4P na poziomie 10% ciśnienia atmosferycznego.

3.2. INFRASTRUKTURA I TABOR SYSTEMU 4P

Infrastruktura. Infrastruktura systemu 4P składa się z szczelnej obudowy lub tunelu, mającego za zadanie utrzymać zadaną wartość ciśnienia, tj. ok. 10% ciśnienia atmosferycznego ~100 hPa; nawierzchni kolejowej odpowiednio dostosowanej do ruchu 20-tonowego pojazdu z prędkością 600 km/h; systemu śluz, zapewniającego przejazd pojazdu z ciśnienia atmosferycznego do ciśnienia 100 hPa.

Tunel. Szczelna obudowa lub tunel ma za zadanie zapewniać odpowiednie ciśnienie. Jednocześnie założono, że musi być tani. Składa się z podstawowego materiału tj., – betonu i zbrojenia oraz materiału uszczelniającego – tworzywa sztucznego. Musi zapewniać odpowiednią wytrzymałość zewnętrzną oraz wewnętrzną.

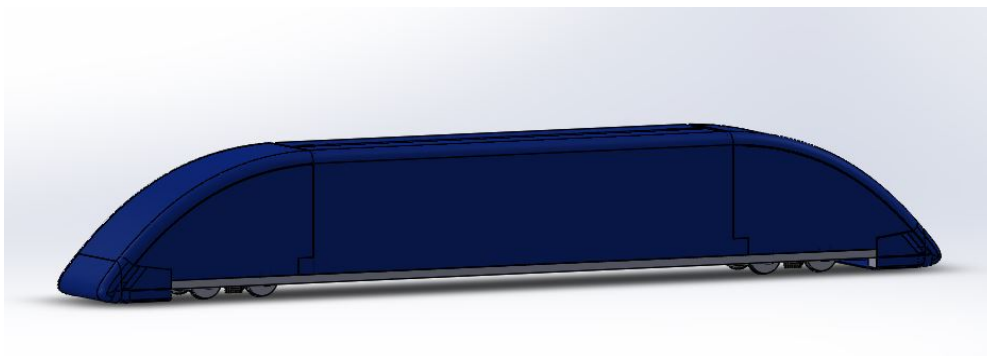
Nawierzchnia kolejowa. Planuje się wykorzystać nawierzchnię kolejową stosowaną w Kolejach Dużych Prędkości. Obecnie mamy infrastrukturę przystosowaną do ponad 400 km/h w warunkach atmosferycznych, przy nacisku na oś 17 ton (KDP w Chinach). W systemie 4P wymagana infrastruktura będzie do prędkości 600 km/h przy nacisku na oś 5 ton. Oprócz przenoszenia drgań, wymagane będzie również uszczelnienie (zwłaszcza w miejscu połączenia z tunelem). Projektując cały system zakładano, że tam, gdzie będzie to możliwe zostaną wykorzystane obecne szlaki komunikacyjne, co będzie przedmiotem analiz w przypadku rozpoczęcia konkretnych prac projektowych. Tym bardziej, że niektóre odcinki między przystankami w Polsce będą zbyt krótkie, aby rozpędzić się do maksymalnej prędkości i z niej wyhamować, a zatem osiągnane prędkości będą mniejsze od 600 km/h.

System śluz. System śluz stosowany jest przy przejściu z ciśnienia atmosferycznego w ciśnienie panujące w infrastrukturze i odwrotnie, a więc przy stacjach. Śluza jest częścią infrastruktury (zawiera nawierzchnie kolejową i tunel) i składa się z komory, drzwi oraz zespołu pomp próżniowych. Śluzowanie odbywa się w sposób analogiczny do śluzowania obiektów pływających. W tym przypadku, zamiast pokonywania różnicy poziomu wód, jest pokonywana różnica ciśnienia.

System modułów infrastruktury. W celu obniżenia kosztów infrastruktury, założono budowę na bazie gotowych modułów, które planuje się dowozić jedynie w miejsce budowy trasy i montować. Moduły będą miały określoną długość, ułatwiającą transport oraz montaż, i będą przygotowywane w zakładach produkcyjnych. W podobny sposób przeprowadzono budowę tunelu Marmaray, który łączy pod wodą europejską i azjatycką część Stambułu. Podczas budowy montowano pod wodą odpowiednio wcześniej przygotowane segmenty tunelu.

Tabor. Tabor stanowi kapsuła przeznaczona do transportu pasażerów lub towarów z prędkością 600 km/h, w środowisku o obniżonym ciśnieniu do 100 hPa. Składa się z układu biegowego (zestawy kołowe i wózki) przeznaczonego do ruchu z założoną prędkością; z układu napędowego (silniki i przekładnia); zasilania trakcyjnego (pakietu baterii); układu hamulcowego (3 rodzaje hamulców); dwustopniowego zawieszenia oraz nadwozia, składającego się z ramy, urządzeń pociągowo-zderznych i pudła oraz wymiennego modułu pasażerskiego lub towarowego. Zakłada się stosowanie obecnie znanych rozwiązań w Ko-

lejach Dużych Prędkości, w celu zapewnienia wysokiego poziomu gotowości technologicznej oraz uniknięcia problemów związanych z rozwojem całkowicie nowych rozwiązań. W przypadku transportu pasażerskiego pojazd wyposażono w urządzenia uszczelniające, urządzenia bezpieczeństwa, toaletę oraz miejsca dla niepełnosprawnych. Kapsuła korzystając z rozstawu 1435 mm będzie się mogła poruszać również w warunkach ciśnienia atmosferycznego. Pojazd ma 22 400 mm długości, 2700 mm szerokości i 2400 mm wysokości. Rozstaw czopów skrzętu wynosi 14 870 mm.



Rys. 4. Widok ogólny kapsuły 4P [5]

Układ napędowy. Układ napędowy składa się z silników, przekładni, przeniesienia napędu oraz odsprężynowania silnika i przekładni. Koncepcja 4P zakłada wykorzystanie trakcji elektrycznej (pakiet baterii), przy układzie osi Bo'Bo' oznacza to wykorzystanie 4 silników, napędzających każdą z 4 osi. Łączna moc pojazdu wynosi 600 kW, co oznacza, że pojedynczy silnik ma moc 150 kW. Przeniesienie napędu realizowane jest za pomocą wału drążonego i sprzęgieł wychyłnych typu Alstom, co pozwoli na całkowite odresorowanie silników i przekładni głównej.

Trakcja. Trakcję stanowi pakiet baterijny. Do jego zalet możemy zaliczyć brak emisji spalin i hałasu, wysoką sprawność układu, większy moment obrotowy niż w pojazdach z napędem spalinowym, niższe koszty eksploatacji, niższe zużycie energii. Wadami są ograniczony zasięg, waga baterii, ograniczona żywotność oraz cena. W systemie 4P, dzięki zastosowaniu systemu wymiany modułów wraz z pakietami baterijnymi na każdej stacji, pozbywamy się ograniczeń wynikających z limitu zasięgu. Maksymalny czas pracy pakietu to 60 minut. Zdecydowano się wybrać pakiet baterijny złożony z dostępnych ogniw litowo-jonowych. Pojemność pakietu baterii wynosi 600 kWh, energia 800 Ah, masa 2740 kg. Sposób chłodzenia jest obecnie patentowany.

Układ hamulcowy. W koncepcji 4P pojazd, ze względów bezpieczeństwa, wyposażony jest w trzy rodzaje hamulców sterowanych elektronicznie i automatycznie. Hamulce spełniają funkcje samoczynności (hamują wtedy, gdy występuje potrzeba), zespołowości (hamują wszystkie pojazdy, w przypadku poruszania się dwóch lub więcej zespolonych kapsuł), stopniowości (możliwość regulacji sił hamujących) oraz niewyczerpalności (hamowanie tyle razy ile potrzeba). Pierwszym hamulcem jest hamulec prądowy, używany w warunkach normalnej eksploatacji. Odpowiednio wcześniej znany będzie profil trasy dlatego hamulec zostanie zaprogramowany, możliwa będzie również prognoza stopnia wykorzystania baterii. System analogiczny do stosowanego w samochodach elektrycznych Nissan Leaf drugiej generacji. Hamulec drugi i trzeci wykorzystuje parę cierną, drugi –

klocek hamulcowy i obręcz zestawu kołowego, trzeci – płoza segmentowa i szyna. Będą to hamulce awaryjne, używane, gdy wystąpi nagła potrzeba skrócenia drogi i czasu hamowania.

Zawieszenie. Idealne zawieszenie winno charakteryzować się częstotliwością drgań równą 1 Hz, gdyż jest to częstotliwość najlepiej znoszona przez pasażerów. Zawieszenie w pojeździe 4P składa się z dwóch stopni. Pierwszy stanowi odsprężynowanie wózka wraz ze wszystkim elementami składowymi na zestawie kołowym. Składają się nań dwie sprężyny śrubowe na węzeł łożyskowy, włączone w układ równoległe (po obu stronach łożyska) oraz tłumik mający na celu tłumienie niepożądanych drgań. Drugi stopień składa się ze sprężyn pneumatycznych, odsprężynowujących nadwozie na ramach wózków oraz czopów skrętu z wbudowanymi elementami gumowymi. Dodatkowo założono wykorzystanie nastawiacza powrotnego, zapewniającego ustawienie wózków w jednej osi, zaraz po wyjściu pojazdu z łuku.

Podwozie. Podwozie składa się z zestawów kołowych, łożysk, prowadzenia łożysk i ramy. Dodatkowo w wózku umieszczone są elementy układu napędowego, zawieszenia oraz układu hamulcowego. W pojeździe 4P znajdują się dwa dwuosiowe wózki, w których każda z osi jest napędzana przez silnik trakcyjny.

Nadwozie. Nadwozie opiera się na wózkach (stanowiących podwozie) i składa się z modułu pasażerskiego lub towarowego, ramy, urządzeń pociągowo-zderznych, pudła, systemu za- i rozładunku, systemu mocowania modułów oraz wewnętrznego wyposażenia.

Moduł pasażerski składa się z przestrzeni pasażerskiej, którą stanowi 9 rzędów po 3 (wersja z przejściem) lub po 4 fotele (wersja bez przejścia), rzędu z miejscami dla niepełnosprawnych, ramy, przestrzeni bagażowej, elementów mocowania modułu w nadwoziu oraz pakietu baterii. Dzięki zastosowaniu systemu wymiennych modułów możemy znacznie skrócić czas załadunku. Po przybyciu na stację, z kapsuły jest wysuwany moduł, który następnie dzięki infrastrukturze stacyjnej jest kierowany na miejsce rozładunku a pakiet baterijny jest kierowany do ładowania. Natomiast do kapsuły jest wsuwany wcześniej załadowany moduł. Rama pojazdu wyposażona jest w zderzaki z modułem crash (zdolność do rozpraszania 1300 kJ na jedno urządzenie), urządzenia pociągowe oraz mechanizm za- i wyładowniczy modułu. Rama przykryta jest pudłem wraz z odpowiednim uszczelnieniem.

Systemy stacji i załadunku. Zespół 4P opracował system w pełni zautomatyzowanej stacji, pozwalającej na start pojazdu co 60 s. Dzięki odpowiedniemu prowadzeniu potoków pasażerskich przez bramki i czujniki, wykorzystaniu odpowiednich rozwiązań na stacjach krańcowych oraz systemowi załadunku, który wykorzystuje moduły pasażerskie lub towarowe wyposażone w pakiet baterii, pozwala na znaczne skrócenie czasu, gdy kapsuła znajduje się na stacji.

Systemy sterowania ruchem. Całość ruchu jest w pełni zautomatyzowana. Profil trasy jest znany odpowiednio wcześniej dlatego można zaprogramować przejazd minimalnoczynasowy pojazdu. Większość hamowań w normalnej eksploatacji wykorzystuje hamowanie silnikami i rekuperację energii. W przypadkach awaryjnych system uruchamia pozostałe hamulce. Na trasie stosowana jest samoczynna blokada liniowa (SBL) podobnie jak w kolejnictwie, w celu zapewnienia odpowiednich odległości między pojazdami. Całość trasy jest wyposażona w czujniki zwracające informację między innymi o bezpieczeństwie, ciśnieniu, przejeździe pojazdu, stanu infrastruktury. Dodatkowo na pokładzie pasażerowie będą wyposażeni w indywidualne systemy bezpieczeństwa.

Systemy bezpieczeństwa. Wdrażanie nowego systemu transportu i pionierskiego środka transportu powoduje wiele obaw. Większość z nich dotyczy bezpieczeństwa. Jest to słuszne, gdyż bezpieczeństwo to kwestia fundamentalna. Stąd też zespół 4P opracował system rozwiązań potencjalnych zagrożeń, które podzielono na poszczególne elementy systemu 4P tj., zagrożenia związane z kapsułą, infrastrukturą, zagrożenia z zewnątrz i zagrożenia katastroficzne. Wyszczególniono poszczególne zagrożenia oraz zestawiono proponowane rozwiązania.

3.3. PRZESŁANKI ROZWOJOWE SYSTEMU 4P

W tabeli 3 zestawiono odległości portów lotniczych od centrów miast.

Tab. 3

Zestawienie liczby obsłużonych pasażerów i odległości do centrum miast dla największych portów lotniczych świata i Polski

Port lotniczy (miasto, kraj)	Liczba obsłużonych pasażerów (2015)	Odległość od centrum miasta [km]
Atlanta Hartsfield-Jackson (Atlanta, USA)	101491106	11
Pekin (Pekin, Chiny)	81929689	20
Londyn Heathrow (Londyn, Wielka Brytania)	70038857	24
Tokio Haneda (Tokio, Japonia)	71639669	14
Dubaj (Dubaj, ZEA)	70475636	5
Okęcie (Warszawa, Polska)	11219837	8
Balice (Kraków, Polska)	4221171	11
Rębiechowo (Gdańsk, Polska)	3709893	10
Pyrzowice (Katowice, Polska)	3069531	30
Strachowice (Wrocław, Polska)	2320676	10

Średnia odległość wynosi ok. 15 km, a czas niezbędny na dojazd waha się od 30 do 60 minut. Obecnie w Polsce istnieją jedynie krótkie odcinki systemu Kolei Dużych Prędkości. Planowana jest budowa KDP I o prędkości 200-250 km/h. Planowana Linia Dużych Prędkości (LDP) pochłonie znaczne fundusze. W tabeli 4 zestawiono średnie koszty budowy 1 km linii dla wybranych systemów transportowych.

Tab. 4

Średnie koszty budowy 1 km infrastruktury

Typ infrastruktury	Koszt budowy 1 km [mln zł]
Hyperloop pasażerski	35
Hyperloop cargo	45
Autostrada	38,4
LDP	24
4P	20

Obserwując postęp w rozwoju KDP na świecie można stwierdzić, że poszczególne komponenty systemu 4P (współpraca koło-szyna, aerodynamika, infrastruktura) są na najwyższym stopniu gotowości technologicznej.

Podsumowując, za wdrożeniem systemu 4P w Polsce przemawiają: luka prędkości między koleją (aktualnie do 200 km/h, a rekord to 293 km/h) a samolotem (800–1000 km/h), średnie odległości między największymi miastami (200–400 km), brak w pełni działającego KDP, koszty i czas wdrożenia planowanego systemu KDP, średnie odległości lotnisk od centrów miast, nieustanny wzrost liczby pasażerów korzystających z samolotów oraz rozwój technologiczny kolei.

3.4. ROZWÓJ KOLEI NISKOCIŚNIENIOWYCH W POLSCE

Technologia Kolei Niskociśnieniowych jest rozwijana przez 7 zespołów w Polsce lub związanych z Polską. Warsaw University Hyperloop Team, Euroloop sp. z o.o., Instytut Północny we Wrocławiu, Pierwszy Polski Pociąg Próżniowy, Hyper-Łódź Team, Hyper Poland sp. z o.o., zespół Uniwersytetu w Edynburgu. Poza zespołem 4P, większość zespołów w stopniu mniejszym lub większym rozwija koncepcję Hyperloop.

Zgodnie z raportami IATA przewozy lotnicze będą rosły w logarytmicznych tempie. W 2017 roku rząd przyjmuje uchwałę rady ministrów, dotycząca koncepcji przygotowania i realizacji inwestycji Centralnego Portu Komunikacyjnego (CPK) dla Rzeczypospolitej Polskiej. W załączniku nr 4 [16] tegoż dokumentu zawarto informacje dotyczące potencjału wdrożenia systemu Kolei Próżniowej w Polsce opartej o Centralny Port Komunikacyjny.

W czerwcu 2018 roku Narodowe Centrum Badań i Rozwoju prezentuje raport [15] dotyczący gotowości technologicznej systemu KNC w Polsce, po wcześniejszym spotkaniu z siedmioma zespołami działającymi w Polsce.

Należy mieć nadzieję, że niebawem rozpocznie się merytoryczna dyskusja nad rozwojem systemu Kolei Niskociśnieniowych w Polsce.

4. POTENCJALNE TRASY PIERWSZEGO POLSKIEGO POCIĄGU PRÓŻNIOWEGO W POLSCE

Po przeanalizowaniu wielu potencjalnych tras, zespół 4P wybrał te, których implementacja byłaby najbardziej opłacalna. Wyróżniono dwie kategorie tras – trasy krótkie oraz trasy dłuższe. Trasy krótkie wynikają ze średniej odległości centrów największych polskich miast do najbliższych lotnisk – ok. 10 km – i są nazywane również trasami lotniskowymi. Skuteczne poprowadzenie tras lotniskowych może również rozwiązywać problemy komunikacyjne dzielnic danego miasta. Trasy dłuższe łączą największe polskie miasta, ośrodki i centra logistyczne (transport towarowy). Mogą również uzupełniać Koleje Dużych Prędkości.

W dotychczasowych rozważaniach wyróżniono następujące trasy krótkie: Wrocław - Stra-

chowice, Katowice - Pyrzowice, Kraków - Balice, Warszawa - Okęcie, Warszawa - Modlin, Warszawa - CPK, Gdańsk - Rębiechowo. Przybliżone koszty budowy systemu 4P dla trasy lotniskowej Wrocław – Strachowice, wynoszą 360 mln zł (11 km; 2 stacje; 20 pojazdów). Analogiczne trasy w wersji Hyperloop'a pasażerskiego wynoszą 520 mln zł, a towarowego 645 mln zł. Oczywiście jest, że średnia prędkość na tych trasach będzie niższa niż na trasach dłuższych, takich jak: Modlin – Warszawa – Okęcie – Radom, Warszawa – CPK – Łódź – Wrocław, trasa dla aglomeracji śląskiej.

5. PORÓWNANIE SYSTEMU PIERWSZEGO POLSKIEGO POCIĄGU PRÓŻNIOWEGO Z HYPERLOOP'EM

Analizując powstałe koncepcje Kolei Niskociśnieniowych można zauważyć, że większość jest zbliżona do koncepcji Hyperloop. Z tego powodu porównano koncepcję Pierwszego Polskiego Pociągu Próżniowego z koncepcją Hyperloop'a.

Gotowość technologiczna. Hyperloop jest obecnie w fazie rozwoju, nigdzie na świecie nie istnieje w pełni działający system. Poszczególne komponenty systemu 4P są obecnie stosowane, a więc mają w zasadzie 9 poziom gotowości technologicznej.

Łatwość wdrożenia. Stosowanie obecnie istniejących i działających komponentów stosowanych w KDP (szyny; rozstaw 1435 mm; wózki i zestawy kołowe) sprawia, że system 4P jest znacznie łatwiejszy do wdrożenia niż Hyperloop, który wymaga rozwijania i wdrożenia wielu rozwiązań na razie istniejących jedynie w fazie koncepcyjnej.

Koszty. Przybliżony koszt 1 km linii 4P jest dwukrotnie mniejszy (20 mln zł) niż koszt 1 km linii Hyperloop (35-45 mln zł).

Technika poruszania się kapsuły. Wykorzystanie magnetycznej lewitacji – Hyperloop - znacznie zwiększa koszty, pojawiają się nowe problemy z rozjazdami, zwiększa drogę hamowania, zmniejsza poziom bezpieczeństwa oraz nie jest popularny tak, jak wykorzystanie pary koło-szyna, założone w koncepcji 4P, co zapewnia łatwość wdrożenia, zmniejsza koszty, ułatwia wykorzystanie rozjazdów, prac manewrowych oraz zwiększa bezpieczeństwo i skraca drogę hamowania.

Prędkości. Hyperloop zakłada poruszanie się kapsuły z prędkością 1000-1200 km/h. Wymaga to bardzo dużych promieni skrętu i znacznie zwiększa drogę hamowania. Koncepcja jest zasadna dla Stanów Zjednoczonych, gdyż autostrady międzystanowe będą niemalże w linii prostej i równolegle można poprowadzić linię Hyperloop'a. W Polsce warunki geograficzne zdają się premiować koncepcję 4P, która zakłada ruch z prędkością maksymalną 600 km/h. Pozwalają na to typowe odległości między największymi miastami (200-400 km), promienie skrętu łuków oraz drogi hamowania.

Ciśnienie w infrastrukturze. Hyperloop zakłada ciśnienie 1hPa, natomiast w systemie 4P panuje ciśnienie 100 hPa. Ciśnienie 1hPa znacznie zmniejsza opory aerodynamiczne, wręcz są bliskie zeru, natomiast jest niezwykle kosztowne w eksploatacji (osiągnięcie i utrzymanie) w dużych objętościach. Ciśnienie 4P jest znacznie łatwiejsze i tańsze w osiągnięciu i utrzymaniu, a zarazem w pełni wystarczające do osiągnięcia maksymalnej prędkości rzędu 600 km/h.

Infrastruktura. Hyperloop zakłada wykorzystanie stalowych tub o przekroju kołowym, prowadzonych nad ziemią na pylonach. System 4P zakłada wykorzystanie nawierzchni kolejowej, prowadzonej naziemnie, krytej szczelną obudową lub w tunelu, utrzymującym odpowiednią szczelność. Rozwiązanie 4P jest tańsze i łatwiejsze technologicznie. Rozwiązanie Hyperloop pozwala ominąć newralgiczne punkty prowadząc infrastrukturę nad nimi. W systemie 4P można lokalnie (miejscowo) stosować rozwiązania przyjęte w systemie Hyperloop.

Energochłonność. Niewielkie opory ruchu w przypadku Hyperloop'a powodują niższą energochłonność niż w przypadku systemu 4P. Nie są to jednak różnice decydujące. Obecne zestawy baterii są w zupełności wystarczające dla systemu 4P.

Stacje i system rozładunku. W obu koncepcjach zarówno kapsuła, jak również infrastruktura jest niewielkich rozmiarów i może być umieszczona w centrach miast. Zespół 4P opracował autorską koncepcję systemu stacji i załadunku, natomiast w przypadku Hyperloop'a powstało szereg koncepcji w zespołach przy różnych uczelniach (Delft University of Technology - TU Delft, Technical University of Munich - TUM, Massachusetts Institute of Technology - MIT).

Automatyzacja. Obie koncepcje zakładają w pełni zautomatyzowany ruch kapsuły na całej długości trasy oraz na stacjach.

Systemy bezpieczeństwa. Obie koncepcje czerpią z systemów stosowanych głównie w lotnictwie oraz w kolejnictwie. Zespół 4P opracował autorskie systemy bezpieczeństwa. Również powstało wiele rozwiązań dotyczących systemu Hyperloop jednak podobnie jak w przypadku stacji, różnią się one w zależności od konkretnego zespołu.

Miejsce w transporcie. Rozważając miejsce w transporcie możemy zauważyć, że obie koncepcje wypełniają lukę między KDP, a lotnictwem. Jednak Hyperloop przeznaczony jest na znacznie większe kraje od Polski, natomiast system 4P wpisuje się w polskie warunki, a nawet może zastąpić lub uzupełnić planowane KDP.

Atrakcyjność. Obie koncepcje są niezwykle atrakcyjne - mogą stanowić magnes turystyczny oraz bodziec do rozwoju gospodarczego.

Podsumowując, koncepcja Pierwszego Polskiego Pociągu Próżniowego (4P) jest znacznie lepsza dla warunków polskich, wydaje się też, że może zastąpić Koleje Dużych Prędkości. Natomiast koncepcja Hyperloop jest dedykowana dla krajów o znacznie większych odległościach i funduszach, o czym świadczą prowadzone rozmowy dotyczące odcinków eksperymentalnych oraz pierwszych odcinków, które będą poddane badaniom eksploatacyjnym.

6. WNIOSKI KOŃCOWE

W niniejszej pracy po raz pierwszy zaprezentowano podstawowe koncepcje związane z wprowadzeniem systemu Kolei Niskociśnieniowych – Pierwszego Polskiego Pociągu Próżniowego 4P na terenie Polski. Przedstawiono podstawowe parametry systemu, nad którym pracowano od roku 2013.

I tak, w pracy przedstawiono rys historyczny zagadnienia, wykazując, że koncepcje podróżowania w szczelnych obudowach lub tunelach nie są całkowicie nowe. Sformułowano

podstawowe założenia systemu 4P, wykazując jego przydatność w warunkach krajowych. Nie jest zasadne, ani opłacalne ekonomicznie, stosowanie prędkości wyższych niż 600 km/h w Polsce. Prędkość jest również skorelowana z ciśnieniem panującym w infrastrukturze dlatego nie jest opłacalne zmniejszanie ciśnienia poniżej 100 hPa. Z racji wysokiej gotowości technologicznej poszczególnych komponentów powinno się rozwijać system oparty na współpracy koło-szyna. Dodatkowo w pracy krótko scharakteryzowano opory ruchu, infrastrukturę, tabor, systemy załadunku, sterowanie ruchem oraz systemy bezpieczeństwa. Wyróżniono przesłanki rozwojowe systemu 4P, porównując to rozwiązanie z systemem Hyperloop. Wymieniono potencjalne krótkie i długie trasy systemu 4P w Polsce.

Należy zaznaczyć, że obok rozmów z zespołem eksperckim NCBiR, zorientowano się o roli innych instytucji, np. Instytutu Kolejnictwa, w całości przedsięwzięcia. Przeprowadzono również rozmowy z przedstawicielami przemysłu w zakresie współpracy przy budowie prototypu kapsuły w Polsce, która może być w części testowana z wykorzystaniem istniejącej infrastruktury. Rozpoznano możliwości budowy toru testowego, który jest niezbędny do dalszego i kompleksowego rozwoju zagadnienia.

Zespół Pierwszego Polskiego Pociągu Próżniowego wyraża zainteresowanie kontynuowaniem prac nad systemem 4P i doprowadzeniem, w krótkim czasie, do wdrożenia tego rozwiązania w Polsce. Warto zaznaczyć, że budowa i rozwój KNC może wpłynąć na rozwój innych gałęzi polskiej gospodarki, takich jak, budowa pojazdów szynowych, technologie próżniowe, produkcja baterii, budownictwo, architektura, kolejnictwo, lotnictwo oraz transport w miastach.

Literatura

1. Madej J.: Teoria ruchu pojazdów szynowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012.
2. Spotkania, dyskusje i analizy zespołu Pierwszego Polskiego Pociągu Próżniowego oraz innych członków koła naukowego Pojazdów i Robotów Mobilnych Pol. Wrocław, 2013 – 2019.
3. SpaceX, Hyperloop alpha, 2013.
4. Mierzwa K.: Projekt wstępny lokalizacji trasy Pierwszego Polskiego Pociągu Próżniowego, praca dyplomowa stopnia inżynierskiego pod kierunkiem Piotra Wrzecioniarza; Wrocław 2016.
5. Mierzwa K.: Projekt wstępny kapsuły Pierwszego Polskiego Pociągu Próżniowego, praca dyplomowa stopnia magisterskiego pod kierunkiem Piotra Wrzecioniarza; Wrocław 2018.
6. Pokładek J.: Projekt wstępny aerodynamiki dla Pierwszego Polskiego Pociągu Próżniowego, praca dyplomowa stopnia magisterskiego pod kierunkiem Piotra Wrzecioniarza; Wrocław 2018.
7. Gogół M.: Analiza ruchu pasażerów i projekt stacji Pierwszego Polskiego Pociągu Próżniowego, praca dyplomowa stopnia inżynierskiego pod kierunkiem Piotra Wrzecioniarza; Wrocław 2018.
8. Czerwotka M.: Preliminary design of transmission in the First Polish Vacuum Train Projekt wstępny aerodynamiki dla Pierwszego Polskiego Pociągu Próżniowego, praca dyplomowa stopnia magisterskiego pod kierunkiem Piotra Wrzecioniarza; Wrocław 2018.
9. Łuczak W.: Wstępny projekt koncepcyjnego Polskiego Hyperloop'a, praca dyplomowa stopnia inżynierskiego pod kierunkiem Piotra Wrzecioniarza; Wrocław 2016.
10. Nowak A.: Podstawowe opory ruchu w pojazdach przyszłości, praca dyplomowa stopnia magisterskiego pod kierunkiem Piotra Wrzecioniarza; Wrocław 2015.
11. Nitin Kumar Thota: Preliminary design of Hyperloop for short distances in India; praca dyplomowa pod kierunkiem Piotra Wrzecioniarza; Wrocław 2017.
12. Ramanaiah Katakam: Preliminary design of Hyperloop for long distances in India; praca dyplomowa pod kierunkiem Piotra Wrzecioniarza; Wrocław 2017.

13. Lowkis D.: Projekt wstępny rozjazdów w systemie Pierwszego Polskiego Pociągu Próżniowego; praca dyplomowa stopnia inżynierskiego pod kierunkiem Piotra Wrzecioniarza; Wrocław 2019.
14. Drab A.: Projekt wstępny kapsuły Pierwszego Polskiego Pociągu Próżniowego z tworzyw sztucznych i aluminium, praca dyplomowa stopnia inżynierskiego pod kierunkiem Piotra Wrzecioniarza; Wrocław 2019.
15. Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, Analiza gotowości technologicznej systemu transportu wykorzystującego pojazdy poruszające się z dużą prędkością w przestrzeni zamkniętej z obniżonym ciśnieniem, Warszawa 2018.
16. UCHWAŁA NR 173/2017 RADY MINISTRÓW z dnia 7 listopada 2017 r.; w sprawie przyjęcia Koncepcji przygotowania i realizacji inwestycji Port Solidarność – Centralny Port Komunikacyjny dla Rzeczypospolitej Polskiej.
17. <https://pl.wikipedia.org/wiki/Hyperloop>; 04.03.2019 r.
18. <https://www.inverse.com/article/15590-expert-says-hyperloop-is-wrong-for-shipping-why-do-we-need-to-move-cargo-at-500-mph>; 04.03.2019 r.

CONCEPT OF THE FIRST POLISH VACUUM TRAIN – 4P

Summary: The paper presents the general concept of the First Polish Vacuum Train, called 4P for short. Against the background of historical solutions, well-known concepts of the Hyperloop system and its own original idea have been characterized, adapted to the conditions prevailing in Poland. Based on previous own work on the development of electromobility, information on the 4P system was presented, selected from 15 studies carried out in 2013-2019, describing issues such as: rolling stock, infrastructure, stations, loading and unloading systems, safety systems, costs, potential routes in Poland. The Hyperloop system was compared with the 4P system, showing the superiority of 4P for national conditions.

Keywords: First Polish Vacuum Train, Hyperloop, Low Pressure Railways

