

RAPORT



**ANALIZA GOTOWOŚCI TECHNOLOGICZNEJ
SYSTEMU TRANSPORTU
WYKORZYSTUJĄCEGO POJAZDY
PORUSZAJĄCE SIĘ Z DUŻĄ PRĘDKOŚCIĄ
W PRZESTRZENI ZAMKNIĘTEJ
Z OBNIŻONYM CIŚNIENIEM**

Opracowali:

dr hab. inż. Ziemowit Malecha, Piotr Krukowski, Piotr Pyrka,
Krzysztof Skrzynecki, dr inż. Piotr Pryciński, Marek Palka

Niniejszy raport stanowi wynik prac Zespołu Ekspertów, powołanego przez NCBR w zakresie analizy gotowości technologicznej systemu transportu, wykorzystującego pojazdy poruszające się z dużą prędkością w środowisku o obniżonym ciśnieniu. Na potrzeby prezentowanego opracowania ww. system transportu określono pojęciem Kolei Niskociśnieniowej (KNC). Raport prezentuje weryfikację krajowego i europejskiego potencjału w obszarze KNC, a także identyfikuje niezbędne komponenty systemu KNC oraz wskazuje rekomendacje w zakresie możliwych scenariuszy rozwoju technologii KNC w Polsce.

Zatwierdził: **prof., dr hab. inż. Maciej Chorowski**

Prezentowany raport końcowy z prac Zespołu Ekspertów ds. Kolei Niskociśnieniowej to cenny zbiór rekomendacji, istotnych z punktu widzenia rozwoju tej technologii w Polsce. Niniejsze opracowanie stanowi wstęp do dalszych prac w zakresie rozwoju technologii próżniowych w Polsce. Narodowe Centrum Badań i Rozwoju wykonując analizę gotowości technologicznej potwierdza, że oprócz finansowania projektów badawczo-rozwojowych wyznacza również trendy rozwoju technologicznego w Polsce.

SPIS TREŚCI

1.	Streszczenie.....	4
2.	Słownik pojęć i skrótów.....	5
3.	Wstęp	6
4.	Weryfikacja krajowego potencjału w zakresie KNC	7
	4.1 Warsaw University Hyperloop Team, Politechnika Warszawska	7
	4.2 Euroloop Sp. z o.o.	7
	4.3 Instytut Północny we Wrocławiu.....	7
	4.4 Zespół Politechniki Wrocławskiej.....	7
	4.5 Zespół Hyper-Łódź Team, Politechnika Łódzka	8
	4.6 Zespół Hyper Poland Sp. z o.o.	8
	4.7 Zespół Uniwersytetu w Edynburgu.....	8
5.	Podsumowanie informacji pozyskanych od zespołów	9
6.	Komponenty KNC	11
	6.1 Technika poruszania się kapsuły	11
	6.1.1 Lewitacja magnetyczna.....	11
	6.1.2 Kapsuła na kołach	12
	6.1.3 Wykorzystanie poduszki gazowej do zawieszenia kapsuły	13
	6.2 System napędowy	13
	6.3 System dostarczania energii.....	15
	6.4 Tunel próżniowy	16
	6.5 Wnioski.....	20
7.	Możliwe konfiguracje KNC	21
8.	Niezbędne kroki w rozwoju KNC w Polsce.....	22
	8.1 Tor testowy	22
	8.2 Homologacja.....	22
9.	Podsumowanie raportu.....	23
10.	Wnioski końcowe oraz rekomendacje.....	26

1. STRESZCZENIE

RAPORT STANOWI PODSUMOWANIE PRACY ZESPOŁU EKSPERTÓW (ZE) NARODOWEGO CENTRUM BADAŃ I ROZWOJU (NCBR) NAD ANALIZĄ GOTOWOŚCI TECHNOLOGICZNEJ SYSTEMU TRANSPORTU, WYKORZYSTUJĄCEGO POJAZDY PORUSZAJĄCE SIĘ Z DUŻĄ PRĘDKOŚCIĄ W PRZESTRZENI ZAMKNIĘTEJ Z OBNIŻONYM CIŚNIENIEM. PRACE ZESPOŁU BYŁY PROWADZONE NA MOCY ZARZĄDZENIA DYREKTORA NCBR, W ZWIĄZKU Z PROŚBĄ SKIEROWANĄ DO NCBR PRZEZ MINISTRA PRZEDSIĘBIORCZOŚCI I TECHNOLOGII JADWIGĘ EMILEWICZ Z 17 GRUDNIA 2017 R.

Zespół tworzyli:

- 1) Dr hab. inż. Ziemowit Malecha
- przewodniczący Zespołu Ekspertów, ekspert zewnętrzny,
- 2) Dr inż. Piotr Pryciński
- sekretarz Zespołu Ekspertów, pracownik NCBR,
- 3) Marek Palka - pracownik NCBR,
- 4) Piotr Krukowski - ekspert wewnętrzny,
- 5) Piotr Pyrka - ekspert zewnętrzny,
- 6) Krzysztof Skrzynecki - ekspert zewnętrzny.

W raporcie przeprowadzono analizę gotowości technologicznej systemu transportu, wykorzystującego pojazdy poruszające się z dużą prędkością w przestrzeni zamkniętej z obniżonym ciśnieniem. Na potrzeby raportu ten system transportu nazwano: Kolej Niskociśnieniowa (KNC). Analizę wykonał Zespół Ekspertów o kompetencjach zbieżnych z problematyką dotyczącą KNC. W szczególności, przeprowadzono przegląd istniejących technologii, zidentyfikowano krajowe i zagraniczne zespoły zajmujące się tematyką KNC, wykonano wstępne obliczenia oraz przygotowano ekspercką ankietę. Ankieta składała się z kilkudziesięciu ogólnych oraz szczegółowych pytań dotyczących technologii i problematyki KNC. Została ona przedstawiona poszczególnym zespołom.

Praca własna Zespołu Ekspertów oraz odpowiedzi na pytania zawarte w ankiecie pozwoliły na wyciągnięcie rzeczowych wniosków, dotyczących gotowości technologicznej KNC. System typu KNC może znacząco obniżyć koszty transportu, zarówno pasażerskiego

jak i towarowego. Dostępne są wszystkie główne technologie potrzebne do budowy systemu KNC. Główną trudnością jest ich integracja w całościowy system KNC. Wiąże się to z powstaniem szeregu problemów, których rozwiązanie wymaga dalszych badań. Przewiduje się, że minimalny czas potrzebny na budowę systemu KNC wraz z homologacją to 15 lat. Nie ma przeciwwskazań do rozwoju systemu transportu KNC w Polsce, gdyż nie jest on konkurencją dla planowanych Kolei Dużych Prędkości (KDP). Do rozwoju technologii KNC w Polsce oraz prowadzenia koniecznych badań potrzebny jest odpowiedni tor testowy. Tor testowy powinien być rozumiany jako duża infrastruktura badawcza służąca do rozwoju technologii i umożliwiająca prowadzenie unikalnych w skali globalnej badań zarówno zjawisk podstawowych (np. dotyczących wymiany ciepła, transformacji energii) jak i stosowanych służących rozwojowi KNC. Dzięki temu, tor testowy będzie przyciągał wysoko wykwalifikowaną kadrę (inżynierów i naukowców) zarówno z kraju jak i zza granicy. Badania przeprowadzone w celu rozwoju technologii KNC będą miały dużo szersze zastosowanie, między innymi, w przemyśle kosmicznym, lotniczym, próżniowym. Proponuje się także przeprowadzenie przez NCBR konkursów w formule partnerstwa innowacyjnego lub zamówień przedkomercyjnych z wykorzystaniem modelu DARPA, w celu rozwiązania wybranych problemów, związanych z technologią KNC. Zespół Ekspertów na podstawie posiadanej wiedzy, korzystając z informacji pozyskanych od zespołów, określił aktualny poziom gotowości technologicznej dla KNC w Polsce na nie więcej niż 4.

2. SŁOWNIK POJĘĆ I SKRÓTÓW

POJĘCIE/SKRÓT	DEFINICJA
1 Ankieta	Zestaw pytań, poprzez które Zespół Ekspertów ustalił najważniejsze fakty, dotyczące systemów KNC, rozwijanych w Polsce
2 CERN (Europejska Organizacja Badań Jądrowych)	Ośrodek naukowo-badawczy w Genewie
3 EDS (<i>Electrodynamic Suspension</i>)	Zawieszenie elektrodynamiczne
4 EMS (<i>Electromagnetic Suspension</i>)	Zawieszenie elektromagnetyczne
5 Hyperloop	Pierwotna nazwa pomysłu Elona Muska na nowy środek transportu, zaprezentowany po raz pierwszy w 2012 r., którego celem było przewożenie pasażerów pomiędzy San Francisco a Los Angeles w USA, z prędkością bliską prędkości dźwięku w specjalnych tubach. Pomysł znalazł licznych naśladowców, którzy zaproponowali różne zmiany w pierwotnej koncepcji, przy zachowaniu nazwy hyperloop. Autorzy proponują używanie terminu KNC, by uniknąć identyfikacji tylko z jednym z proponowanych rozwiązań.
6 Kapsuła	Pojazd, poruszający się w tunelu próżniowym
7 KDP	Kolej Dużych Prędkości
8 KNC	Kolej Niskociśnieniowa czyli system transportu, wykorzystujący pojazdy poruszające się z dużą prędkością w przestrzeni zamkniętej z obniżonym ciśnieniem.
9 LHC	Wielki Zderzacz Hadronów
10 Maglev	Kolej wykorzystująca zjawisko lewitacji magnetycznej
11 Poziom gotowości technologicznej TRL	Poziom gotowości technologicznej, dziewięciostopniowa skala służąca do oceny poziomu gotowości technologicznej produktu lub technologii, sposób opisu dojrzałości technologii oraz narzędzie służące porównaniu stanu zaawansowania prac nad różnymi technologiami. Dojrzałość technologii opisuje się od fazy konceptualizacji konkretnego rozwiązania (TRL 1), aż do etapu dojrzałości (TRL 9). TRL 9 oznacza, że koncepcja w wyniku prowadzonych badań naukowych i prac rozwojowych przybrała postać rozwiązania technologicznego, które można zastosować w praktyce – np. w postaci uruchomienia rynkowej produkcji (źródło: www.ncbr.gov.pl)
12 Tunel próżniowy	Tunel naziemny lub podziemny wraz z infrastrukturą, z obniżonym ciśnieniem, będący środowiskiem, w którym poruszają się pojazdy KNC
13 Zespół Ekspertów (ZE)	Powołany zarządzeniem nr 7/2018 Dyrektora Narodowego Centrum Badań i Rozwoju z dnia 1 lutego 2018 r. w sprawie powołania Zespołu Ekspertów do przeprowadzenia ww. analizy gotowości technologicznej systemu transportu wykorzystującego pojazdy poruszające się w środowisku o obniżonym ciśnieniu
14 Zespół	Grupa osób, zajmująca się problematyką KNC, która przedstawiła Zespołowi Ekspertów swój dorobek koncepcyjny i badawczy oraz odpowiedziała na pytania zawarte w ankiecie

3. WSTĘP

ZESPÓŁ EKSPERTÓW OPRACOWAŁ ANKIETĘ, ZAWIERAJĄCĄ KILKADZIESIĄT PYTAŃ, ZIDENTYFIKOWAŁ ZESPOŁY ZAJMUJĄCE SIĘ PROBLEMATYKĄ KNC W POLSCE I ZA GRANICĄ A NASTĘPNIE SPOTYKAŁ SIĘ INDYWIDUALNIE Z ICH PRZEDSTAWICIELAMI. TABELA PONIŻEJ PRZEDSTAWIA TE ZESPOŁY I OPISUJE HARMONOGRAM SPOTKAŃ ZESPOŁU EKSPERTÓW Z NIMI.

	NAZWA ZESPOŁU	LIDER ZESPOŁU	DATA SPOTKANIA	MIEJSCE SPOTKANIA
1	Zespół Warsaw University Hyperloop Team, Politechnika Warszawska	Janusz Piechna	06.03.2018	Warszawa
2	Zespół Euroloop	Marek Gutt-Mostowy	06.03.2018	Warszawa
3	Zespół Instytutu Północnego, Wrocław	Antoni Szumny	14.03.2018	Wrocław
4	Zespół 4P absolwentów Politechniki Wrocławskiej	Piotr Wrzecioniarz	14.03.2018	Wrocław
5	Zespół Hyper-Łódź Team, Politechnika Łódzka	Adam Zarzycki	23.03.2018	Warszawa
6	Zespół Hyper Poland	Przemysław Pączek	23.03.2018	Warszawa
7	Zespół Uniwersytetu w Edynburgu	Grzegorz Marecki i Adam Anyszewski	03.04.2018	Warszawa

Podczas spotkań z zespołami omówiono i przekazano ankietę. Następnie każdy zespół przesłał odpowiedzi do ankiety. Niektóre z zespołów przekazały ZE dodatkowe materiały.

Oprócz spotkań z w/w zespołami Zespół Ekspertów:

1. odbył wizytę studialną w Holandii w dn. 04.04.2018 r. w celu spotkania się z przedstawicielami firmy Hardt Global Mobility, zaangażowanej m.in. w realizację toru testowego.

2. spotkał się w Warszawie w dn. 27.04.2018 r. z kierownictwem Instytutu Pojazdów Szynowych „Tabor” z Poznania w celu przedyskutowania problemów z certyfikacją i homologacją KNC.

Łącznie ZE odbył spotkania z ponad 30 ekspertami krajowymi i zagranicznymi, zajmującymi się rozwojem technologii KNC w Polsce i w Europie. Przygotowanie tego raportu umożliwiły odpowiedzi na ankietę, dyskusje z zespołami, analiza źródeł zastanych (*desk research*) a także wiedza i doświadczenie członków Zespołu Ekspertów.

4.

WERYFIKACJA KRAJOWEGO POTENCJAŁU W ZAKRESIE KNC

WERYFIKACJA KRAJOWEGO POTENCJAŁU BYŁA JEDNYM Z PODSTAWOWYCH ZADAŃ ZESPOŁU EKSPERTÓW. PONIŻEJ PRZEDSTAWIONO GŁÓWNE USTALENIA TEJ WERYFIKACJI.

4.1 WARSAW UNIVERSITY HYPERLOOP TEAM, POLITECHNIKA WARSZAWSKA; LIDER - DR HAB. INŻ. JANUSZ PIECHNA.

Zespół:

- tworzą głównie pracownicy i absolwenci Wydziału Mechaniki, Energetyki i Lotnictwa (MEL) Politechniki,
- nie posiada stałego składu i jest rozszerzany w zależności od potrzeb,
- dokonał kompleksowej analizy KNC w następujących aspektach: bezpieczeństwo, tunel, odprowadzenie ciepła, konstrukcja kapsuł, planowane i opracowanie symulatora do badania wpływu technologii na pasażerów,
- uczestniczył w międzynarodowych konkursach na projekt stacji obsługi podróżnych oraz kapsułę pojazdu,
- proponuje budowę tunelu testowego KNC w pobliżu Centralnego Portu Komunikacyjnego, z możliwością przekształcenia tego tunelu w odcinek eksploatacyjny,
- podkreśla konieczność ustalenia podstawowych standardów dotyczących KNC.

4.2 EUROLOOP SP. Z O.O.; LIDER - MAREK GUTT-MOSTOWY.

Zespół:

- wypracował koncepcję wykorzystania KNC do przewozu ładunków w Polsce,
- dysponuje podpisanymi listami intencyjnymi z zainteresowanymi firmami,
- planuje test technologii i uruchomienie komercyjnego odcinka do przewozu ładunków,
- nie przedstawił szczegółów technicznych planowanego odcinka testowego.

4.3 INSTYTUT PÓŁNOCNY WE WROCŁAWIU; LIDER - PROF. ANTONI SZUMNY.

Zespół:

- podkreśla zalety rozwiązania na kołach,
- zajmuje się problematyką KNC od 10 lat; pierwsza prezentacja koncepcji miała miejsce w Gdańsku w 2011 r.,
- w 2017 r. przekazał do Ministerstwa Rozwoju kosztorys Ultraszybkiej Kolei Próżniowej (USKP),
- proponuje gwiazdziste połączenia komunikacyjne z punktem centralnym w Warszawie,
- przewiduje realizację przewozów pasażerów oraz ładunków,
- deklaruje gotowość do angażowania się w prace nad KNC,
- przedstawił założone parametry pracy kolei próżniowej i sposoby ich osiągnięcia,
- prowadzi badania teoretyczne i jest zainteresowany rozpoczęciem badań doświadczalnych,
- nie prowadzi badań doświadczalnych.

4.4 ZESPÓŁ POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ; LIDER - PROF. PIOTR WRZECIONIAZ.

Zespół:

- składa się z ponad 100 osób, głównie absolwentów Politechniki Wrocławskiej pracujących w różnych firmach z obszaru certyfikacji, robotyzacji ruchu, projektowania kapsuły, układów hamulcowych, obsługi przepływów pasażerów, bateryjnych układów zasilania, pojazdów elektrycznych, silników elektrycznych, infrastruktury i bezpieczeństwa, układów niskociśnieniowych,
- opracował bardzo zaawansowaną koncepcję systemu transportu KNC o autorskiej nazwie 4P (Pierwszy Polski Pociąg Próżniowy),
- wśród zespołów akademickich prowadzi prawdopodobnie najbardziej zaawansowane badania w zakresie zastosowania technologii KNC,
- współpracuje z biznesem,
- opracował projekt stacji (przesiadkowej i końcowej) dla 4P,

- przeprowadził rozmowy z Państwową Komisją Badania Wypadków Kolejowych,
- opracował całość przedsięwzięcia a także projekt stacji (przesiadkowej i końcowej) dla 4P, dla kilku koncepcji różnych tras, również rozwiązanie układu napędowego,
- nie widzi żadnych barier w zagadnieniach związanych z próżnią czy np. materiałami stosowanymi w ramach 4P. Obecnie jedynym komponentem spoza Polski, niezbędnym do uruchomienia 4P są koła oraz pompy próżniowe,
- identyfikuje trudności związane z wdrożeniem klasycznej KNC opartej o lewitację magnetyczną w Polsce w braku wiedzy podstawowej u wszystkich zespołów na świecie, wysokich kosztach budowy infrastruktury, niewystarczającym strumieniu pasażerów na niektórych trasach w Polsce,
- proponuje zastosowanie własnego systemu napędu, które spowoduje, że rozwiązanie 4P stanie się łatwiejsze do wdrożenia, zapewni bezpieczeństwo, mniejsze koszty budowy oraz możliwości wykorzystania istniejącej infrastruktury a także ewentualnego wdrożenia systemu 4P poza granicami kraju,
- planuje opracowanie autorskiej kapsuły 4P w roku 2018 r.

4.5 ZESPÓŁ HYPER-ŁÓDZ TEAM, POLITECHNIKA ŁÓDZKA; LIDER - P. ADAM ZARZYCKI.

Zespół:

- składał się z 13 studentów (obecnie absolwentów),
- obecnie zawiesił działalność,
- uczestniczył w I konkursie SpaceX, zorganizowanym przez Elona Muska. W ramach pracy konkursowej powstał całościowy projekt KNC (*Final Design Package*) opisujący: kapsułę, napęd, eksploatację, tunel, rozjazd, bezpieczeństwo, ergonomię. Było to opracowanie teoretyczne.

4.6 ZESPÓŁ HYPER POLAND SP. Z O.O.; LIDER – P. PRZEMYSŁAW PĄCZEK.

Zespół:

- zaproponował koncepcję KNC w trzech wariantach:
 - platforma logistyczna wykorzystująca technologię pasywnej lewitacji magnetycznej oraz silnik liniowy,
 - platforma logistyczna jako system z niskim ciśnieniem,
 - wersja pasażerska, zespół przedstawił przemysłany i zaawansowany projekt toru testowego,

- podjął współpracę z Instytutem Kolejnictwa, której celem ma być m.in. uruchomienie odcinka testowego w Żmigrodzie,
- zidentyfikował zapotrzebowanie na nowe środki transportu w Polsce,
- złożył wniosek pt. „Opracowanie technologii napędu liniowego oraz magnetycznego systemu lewitacji i stabilizacji typu EDS do magnetycznej Kolei Nisko-Ciśnieniowej” w ramach „Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020, Oś priorytetowa Wsparcie prowadzenia prac B+R przez przedsiębiorstwa, Działanie Projekty B+R przedsiębiorstw, Poddziałanie Badania przemysłowe i prace rozwojowe realizowane przez przedsiębiorstwa, 1/1.1.1/2018 Szybka Ścieżka 5”,
- nawiązał szerokie kontakty biznesowe z potencjalnymi partnerami i użytkownikami systemu, m.in na potrzeby wdrożeń pilotażowych, w szczególności w Polsce, na Litwie, w Niemczech, we Francji oraz w Izraelu,
- zaprosił do współpracy wybitnych ekspertów zagranicznych posiadających wieloletnie doświadczenie międzynarodowe.

4.7. ZESPÓŁ UNIWERSYTETU W EDYNBURGU; LIDERZY: GRZEGORZ MARECKI I ADAM ANYSZEWSKI.

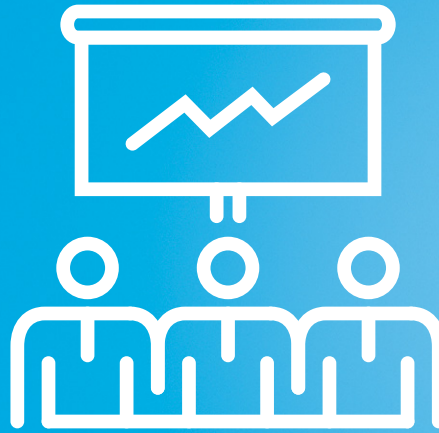
Zespół:

- buduje oprogramowanie optymalizacyjne, które będzie podstawą do podejmowania strategicznych decyzji projektowych,
- pracuje nad standaryzacją i stworzeniem programowego symulatora systemu hyperloop, który posłuży zewnętrznym firmom do projektowania i produkcji podzespołów,
- współpracuje z rządem brytyjskim nad wytyczeniem tras oraz strukturą finansowania rozwoju technologii hyperloop poprzez granty rządowe,
- planuje uruchomienie spółki.

Zespół Ekspertów ustalił również, że rozwój KNC poza Polską to nie tylko przedsięwzięcia Elona Muska i Richarda Bransona. Niektóre kraje europejskie a także Chiny, Indie, Abu Zabi mają własne strategie rozwoju KNC. Finansowanie prac badawczo-rozwojowych wszędzie odbywa się z wykorzystaniem zarówno środków prywatnych jak i publicznych.

Najbardziej zaawansowane zespoły w Europie, to:

- Swiss Metro w Szwajcarii,
- Uniwersytet w Delft w Holandii,
- Firma Hardt Global Mobility w Holandii, która pozyskała finansowanie rządowe na budowę toru testowego.



5.

PODSUMOWANIE INFORMACJI POZYSKANYCH OD ZESPOŁÓW

Choć rozwiązania przedstawione przez poszczególne zespoły są zróżnicowane, niektóre elementy występują w każdym z nich. Z odpowiedzi na pytania ankiety, udzielonych przez zespoły wynika, że:

- technologie wytwarzania poszczególnych elementów składowych KNC (napęd, zawieszenie, wykonanie tunelu, utrzymanie pożądanego poziomu niskiego ciśnienia itd.) są już opracowane i sprawdzone w innych, istniejących środkach transportu lub gałęziach przemysłu,
- kluczowym elementem KNC jest środowisko o obniżonym ciśnieniu, które pomaga w znacznym stopniu zredukować opory ruchu i tym samym znacznie zredukować zapotrzebowanie na energię. Poruszanie się w tunelu gwarantuje niewrażliwość na niekorzystne warunki pogodowe (np. silny wiatr),
- przeważnie zakładany poziom ciśnienia w tunelu mieści się w zakresie 100–10 000 Pa, co gwarantuje

oczekiwane zmniejszenie oporów i nie generuje problemów, jakie miałyby miejsce w przypadku głębokiej próżni (gazowanie materiałów, problemy związane ze szczelnością, problemy z wymianą ciepła). Pozwala to także na użycie dostępnych na rynku podzespołów i rozwiązań bez większych modyfikacji,

- najbardziej uzasadnioną prędkością maksymalną dla KNC jest wartość 600 km/h. Wiąże się to z możliwością użycia istniejących technologii oraz zabezpiecza przed niepożądanymi zjawiskami w tunelu (fala uderzeniowa, przepływ dławiony), które mogą mieć miejsce przy większych prędkościach,
- główną trudnością w realizacji KNC jest integracja istniejących rozwiązań w jeden system,
- konieczne jest szybkie zbudowanie tunelu testowego w Polsce.

W tabeli poniżej zebrano odpowiedzi na najważniejsze pytania udzielone przez zespoły.

WYBRANE PYTANIA SKIEROWANE DO ZESPOŁÓW	ODPOWIEDZI ZESPOŁÓW
Samooceńca dotycząca poziomu gotowości technologicznej	TRL od 1 do 4
Liczba osób aktywnie pracujących w zespole	od 0 do 26 (maks. 100)
Szacunkowy czas na wybudowanie toru testowego	od 18 miesięcy do 4 lat
Szacowany koszt budowy tunelu testowego i wyposażenia	10 mln EUR/1 km (dla porównania: autostrada - 10 mln EUR; KDP 5 - 60 mln EUR; hyperloop 10 - 20 mln EUR)
Szacunkowy czas wybudowania KNC pasażerskiej	od 10 do 15 lat
Zakładany poziom ciśnienia w tunelu	od 1 Pa do 10 kPa
Proponowane materiały na budowę tunelu	stal, uszczelniany beton, tworzywa sztuczne
Zakładana prędkość kapsuły	towarowa do 200 km/h, pasażerska do 600 km/h, (1 100 km/h)
Sposób zawieszenia pojazdu w tunelu	koła lub lewitacja magnetyczna (pasywna)
Sposób napędu kapsuły	silniki w wózkach; silniki liniowe
Zakładane przyspieszenie kapsuły	od 0,36 do 1 G
Liczba pasażerów w pojeździe	od 25 do 50 (jeden zespół wskazał maks. 300)
Minimalne odstępy czasu między kapsułami	od 15 s do 4 min
Planowana przepustowość linii (kapsuły/h)	od 15 do 240 kapsuł na godzinę
Szacowana zdolność przewozowa jednej linii KNC	od 720 do 6000 pasażerów na godzinę
Czas wymiany pasażerów (wejście/wyjście na pokład)	od 1 do 15 min
Średnica tunelu	od 3,3 do 8 metrów
Brakujące technologie	wszystkie są dostępne w wersji umożliwiającej start projektu, nieoptymalizowanej pod kątem KNC
Możliwość wykonania „rozjazdów” na trasie	możliwe w realizacji i przewidywane przez zespoły

6. KOMPONENTY KNC

KNC JEST NOWĄ TECHNOLOGIĄ, ALE WYKORZYSTUJĄCĄ ISTNIEJĄCE ELEMENTY. KONIECZNE JEST JEDNAK OPRACOWANIE WIELU NOWYCH KOMPONENTÓW. NAJISTOTNIEJSZE SĄ SYSTEMY POZWALAJĄCE NA PORUSZANIE I NAPĘDZANIE KAPSUŁY W TORZE, TUNEL PRÓŻNIOWY WRAZ Z ELEMENTAMI WYPOSAŻENIA, KAPSUŁA ORAZ SZEREG ELEMENTÓW POMOCNICZYCH NP.: ŚLUZY, URZĄDZENIA UTRZYMUJĄCE PRÓŻNIĘ, SYSTEMY BEZPIECZEŃSTWA, SYSTEMY ZARZĄDZANIA, STACJE, ITP.

6.1 TECHNIKA PORUSZANIA SIĘ KAPSUŁY

W celu umożliwienia poruszania się kapsuły w tunelu niezbędny jest system zawieszenia kapsuły, który zapewni stabilność kapsuły w wyznaczonym torze jazdy. System zawieszenia powinien cechować się niskimi oporami ruchu i wysokim poziomem bezpieczeństwa. System zawieszenia może być uzależniony od zakładanych prędkości kapsuły.

6.1.1 LEWITACJA MAGNETYCZNA

Proponowany przez niektóre zespoły sposób poruszania się kapsuły w tunelu próżniowym wykorzystuje lewitację magnetyczną. Systemy poruszania się pojazdów oparte na lewitacji magnetycznej można podzielić na kilka rodzajów.

Systemy wykorzystujące EMS (*Electromagnetic Suspension*)

W systemie tego rodzaju lewitacja istnieje dzięki siłom przyciągania, występującym pomiędzy torem i elektromagnesami, umieszczonymi w pojeździe. System ten jest niestabilny i wymagane jest zastosowanie kontrolerów do zachowania jego poprawnej pracy. Lewitacja możliwa jest nawet przy braku ruchu pojazdu. Część pola magnetycznego elektromagnesów w pojeździe może pochodzić od magnesów trwałych – w ten sposób można zmniejszyć prąd płynący przez elektromagnesy w pojeździe i w konsekwencji potrzebna moc do zachowania lewitacji może być bardzo niewielka. W kolejach typu maglev (kolej magnetyczna) tor typu EMS jest stosowany w dolnej części pociągu, natomiast w KNC może być również stosowany w górnej części pojazdu – w takim przypadku pojazd jest niejako podwieszony na elektromagnesach, utrzymując dystans rzędu kilku centymetrów od toru. Dzięki małemu zużyciu energii, część wytwarzająca lewitację (czyli część odpowiadająca za zasilanie magnesów w pojeździe) może być zasilana zarówno z systemu bateryjnego wewnątrz pojazdu jak i z energii przekazanej z zewnątrz. W przypadku zastosowania systemu tego rodzaju, naturalne jest zastosowanie napędu działającego na zasadzie synchronicznego silnika liniowego. W takim przypadku tor, który wykorzystywany jest do lewitacji, zawiera jednocześnie cewki stojana, zdolne do rozpędzenia pociągu.

Na podstawie rozmów z zespołami wnioskować można, że w przypadku tego systemu, stosunek siły nośnej do oporu ruchu jest rzędu 200:1, co oznacza, że dla pojazdu o masie rzędu 20 t, rozpędzonego do prędkości 600 km/h potrzeba ok 170 kW tylko na pokonanie oporów związanych z koniecznością przemagnesowywania toru – straty te wydzielają się w torze, poza pojazdem. Moc strat, wynikająca z niedoskonałości napędu, również wydzielają się w torze.

Systemy wykorzystujące EDS (*Electrodynamic suspension*)

Siła nośna powstaje dzięki indukowanym prądom wirującym przepływającym w przewodniku, znajdującym się w zmiennym polu magnetycznym. Rozwiązanie to można podzielić na kilka kategorii:

1. Wykorzystanie lewitacji w oparciu o prądy indukowane w jednorodnej płycie z przewodnika (dobrego przewodnika, niewykazującego właściwości ferromagnetycznych, np. z miedzi). Rozwiązanie to cechuje przede wszystkim względna prostota konstrukcji a co za tym idzie, niska cena. Wadą tego rozwiązania jest jednak relatywnie duży opór. Stosunek oporu do siły nośnej dla takiego systemu maleje ze wzrostem prędkości i wynosi ok. 1:5 – 1:20 przy prędkościach rzędu 540 km/h lecz może być zredukowany do ok. 1:40, przy zastosowaniu magnesów nadprzewodzących. System ten generuje więc istotne straty energii potrzebnej na wytworzenie siły nośnej. Być może należy je uznać za zbyt duże, niemożliwe do zaakceptowania.
2. Zastosowanie toru typu **Indutrack**. Poruszające się magnesy trwale wytwarzają prądy wirowe w zwartych cewkach położonych w torze, w wyniku czego powstają siły odpychające. System ten jest niewydajny dla małych prędkości, ale przy 500 km/h oczekiwany stosunek siły nośnej do oporu wynosi 200:1. Zaletą tego rozwiązania jest jego stabilność.
3. Rozwiązanie „**null flux**”.

W rozwiązaniu tym, w torze, po obu stronach pojazdu umieszcza się zwarte zwoje ukształtowane na wzór cyfry '8', położone w orientacji pionowej tak, aby magnesy w pojeździe poruszały się w połowie cewki. W taki sposób indukowane prądy wirowe wytwarzają siłę nośną. Rozwiązanie to jest o tyle ciekawe, że w przypadku, gdy magnesy poruszają się w połowie wysokości takiego zwoju, napięcia

JEDNYM ZE SPOSOBÓW ZAWIESZENIA KAPSUŁY W TUNELU JEST WYKORZYSTANIE KÓŁ



indukowane w górnej i dolnej jego części znoszą się a w przypadku przesunięcia się magnesu w górę lub dół, wystąpią siły korygujące położenie magnesu.

Wszystkie systemy typu EDS mają wspólną wadę – nie działają przy małych prędkościach. Konieczne jest więc zastosowanie systemu alternatywnego, przynajmniej na stacjach początkowych i końcowych. Ze względów bezpieczeństwa może okazać się niezbędne, aby dodatkowy tor prowadzony był przez całą długość tunelu na wypadek zatrzymania awaryjnego poza stacjami.

Wadą systemów lewitacji magnetycznej jest konieczność ekranowania pola magnetycznego od reszty pojazdu oraz od urządzeń znajdujących się w tunelu. Problem ten jest łatwiejszy do rozwiązania w przypadku systemów o zwartej konstrukcji (jak EMS) a trudniejszy, gdy pole magnetyczne obejmuje dużą przestrzeń – jak w przypadku EDS “null flux”.

Wadą systemów lewitacji magnetycznej są również duże siły oporu. W niektórych z tych systemów opory są umiarkowane i mogą być zaakceptowane (EMS, EDS Indutrack), ale np. w pasywnym EDS, opartym na torze wykonanym z płyt z przewodnika, opory są zbyt duże. Systemy te wymagają również dość drogiej infrastruktury. Wyjątkiem jest tu tor pasywny z płyt z przewodnika, gdzie koszt ten jest umiarkowany.

Zaletą systemów lewitacji jest nieduże zużycie części związanych zarówno z poruszaniem się jak i napędem. W systemach tych kontakt pomiędzy kapsułą a torem nie występuje praktycznie wcale (EMS), lub występuje, ale jedynie dla niewielkich prędkości. Systemy EDS dla małych prędkości wytwarzają niedostateczną siłę nośną dla pokonania siły grawitacji. W tym przypadku na pewnych, niewielkich odcinkach musiałby być zastosowany dodatkowy system – np. kołowy, który w takim przypadku, nie musi być jednak dostosowany do pracy z dużymi prędkościami.

Wybierając system lewitacji należy odpowiednio dobrać system napędu. W przypadku EMS wybór jest dość naturalny – w tor można wbudować cewki zdolne do wytworzenia pola magnetycznego, poruszającego się z prędkością pojazdu, które wytworzą siłę napędzającą lub hamującą, dzięki interakcji z magnesami wytwarzającymi lewitację magnetyczną. Napęd taki

działać będzie na zasadzie silnika synchronicznego. W przypadku systemu EDS naturalnym również zdaje się dobranie napędu liniowego. Jedną z możliwości jest zastosowanie liniowego silnika indukcyjnego, który jednocześnie wytwarza lewitację oraz siłę napędzającą. W takim przypadku należy zweryfikować sprawność energetyczną całego urządzenia, w szczególności, jak duża moc (oraz ilość energii potrzebna do pokonania jednostki długości) jest wymagana podczas poruszania się z dużą prędkością. Może się okazać, że moc potrzebna do utrzymania lewitacji jest bardzo duża. W przypadku zastosowania systemu pasywnego (Indutrack, null-flux, płyty z przewodnika) system napędowy należy dobrać osobno lub rozszerzyć system lewitacji o możliwość napędzania. Przykładem rozwiązania może być dodanie osobnego zestawu cewek. Warto w tym przypadku mieć na uwadze ewentualną interakcję między systemem pasywnym lewitacji a systemem napędowym.

6.1.2 KAPSUŁA NA KOŁACH

Jednym ze sposobów zawieszenia kapsuły w tunelu jest wykorzystanie kół. Ze względu na zakładane prędkości poruszania się oraz środowisko obniżonego ciśnienia (możliwość gazowania) rozważane są praktycznie tylko koła stalowe, poruszające się po szynach. Rozwiązanie to jest powszechnie znane i wykorzystywane w kolei konwencjonalnej. Możliwe jest wtedy zastosowanie napędu za pomocą kół napędowych, jednak nie jest wykluczane wykorzystanie silnika liniowego. Stalowe koła zapewniają mniejsze straty toczenia od lewitacji magnetycznej. Ograniczeniem kół jest maksymalna prędkość poruszania pojazdu, prawdopodobnie do około 600 km/h przy obecnie dostępnych technologiach. Niezidentyfikowanym problemem w wykorzystaniu kół w tunelu o obniżonym ciśnieniu jest zabrudzenie tunelu i systemu podtrzymywania próżni opiłkami wynikającymi ze ścierania się kół i szyn. Dodatkowo mogą wystąpić problemy z wykorzystanymi smarami, ponieważ lotne dodatki będą mieć tendencję do szybkiego odparowywania w obniżonym ciśnieniu. Wskazane problemy powinny być jednak stosunkowo łatwe do rozwiązania, w porównaniu z opracowaniem skomplikowanego, nowatorskiego systemu lewitacji magnetycznej. Dodatkową zaletą tunelu jest ochrona przed warunkami atmosferycznymi, co korzystnie wpłynie na trwałość stalowych elementów zawieszenia.

6.1.3 WYKORZYSTANIE PODUSZKI GAZOWEJ DO ZAWIESZENIA KAPSUŁY

Jednym z możliwych sposobów zawieszenia kapsuły jest wykorzystanie poduszki gazowej. Koncepcja ta polega na wtłoczeniu pod ciśnieniem powietrza w szczelinę pomiędzy kapsułą, a torem. Wytworzone ciśnienie gazu utrzymuje kapsułę zawieszoną i zapewnia brak kontaktu z torem. Zjawisko to w dużo mniejszej skali jest wykorzystywane w łożyskach powietrznych lub np. grze cymbergaj (hokej powietrzny). Ten typ zawieszenia został zaproponowany w pierwotnej koncepcji Elona Muska, jednak obecnie rezygnuje się z tego rozwiązania. Poduszka powietrzna teoretycznie może być wykorzystana do zawieszenia kapsuły KNC, jednak wiąże się z szeregiem problemów, z których główne to:

- potrzeba wykorzystania kompresora, pracującego w warunkach obniżonego ciśnienia, który zasysa powietrze sprzed pojazdu i tłoczy je do elementów zawieszenia. Kompresor tego typu musiałby zostać opracowany od podstaw, do założonych parametrów pracy (ciśnienie, prędkość, przepływ, wymagane ciśnienie do systemów zawieszenia). Alternatywą dla kompresora jest wykorzystanie sań, których kształt zapewniałby kompresowanie powietrza i wtłaczanie do elementów zawieszenia. System ten jednak działa od pewnej prędkości, do której wymagany jest inny system zawieszenia (np. koła).
- kapsuła zawieszona byłaby na wysokości rzędu kilku milimetrów. Obecnie dostępne technologie zapewniają tego typu precyzję wykonania, jednak

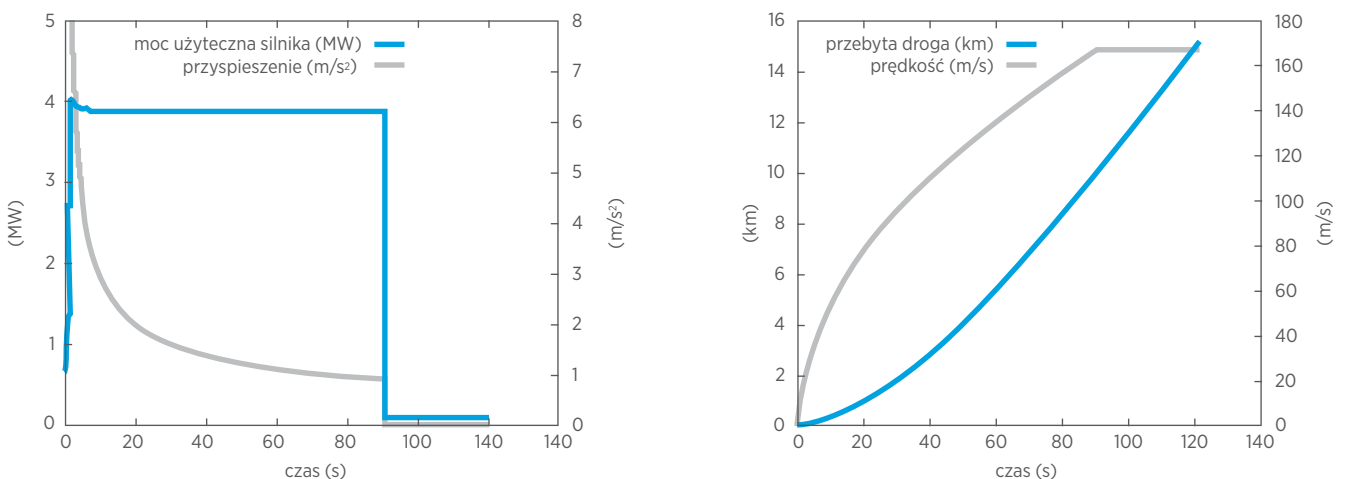
wiąże się to z bardzo dużymi kosztami, w przypadku konieczności konstruowania wielokilometrowego toru o średnicy kilku metrów, gdzie tolerancja średnicy wewnętrznej musiałaby być mniejsza od 1 mm na całą długości.

Problemy opisane powyżej spowodowały, że wszystkie zespoły odrzuciły ten typ zawieszenia pojazdu.

6.2 SYSTEM NAPĘDOWY

Na potrzeby rozważań dotyczących napędów, jakie mogą być wykorzystane w KNC a także potrzebnych mocy, powstających oporów itp., przyjmijmy, że kapsuła użyta w KNC ma masę ok. 25 t, a jej maksymalna prędkość wynosi 600 km/h (parametry najczęściej wskazywane przez zespoły).

Aby rozpędzić taki pojazd, zakładając napęd kołowy i opory toczenia 1:1000 (zatem siłę oporu 250 N) oraz pomijalne opory aerodynamiczne i sprawność układu napędowego wynoszącą 100% (założenia nierealnie optymistyczne) na dystansie 20 km (podczas rozmów z zespołami najczęściej pojawiającymi się wartościami było 10-20 km na rozpędzenie, choć pojawiały się wartości tak niskie jak 2 km) potrzeba silnika o mocy trochę ponad 1,9 MW. Będzie to możliwe przy założeniu, że przez cały czas rozpędzania będzie on wykorzystywał 100% swojej mocy. Jeśli pojazd miałby być rozpędzony na dystansie 10 km, potrzeba tej mocy już ok 3,9 MW, rysunek 1.



Rys. 1. Lewy: Moc dostarczana do napędu pojazdu i odpowiadające jej przyspieszenie w funkcji czasu. Prawy: zmiana prędkości w czasie oraz przebyta droga, odpowiadająca warunkom przedstawionym na lewym obrazku. Na rozpędzenie omawianego pojazdu do prędkości 600 km/h (167 m/s) potrzeba około 10 km oraz napędu o mocy użytecznej 3,9 MW.

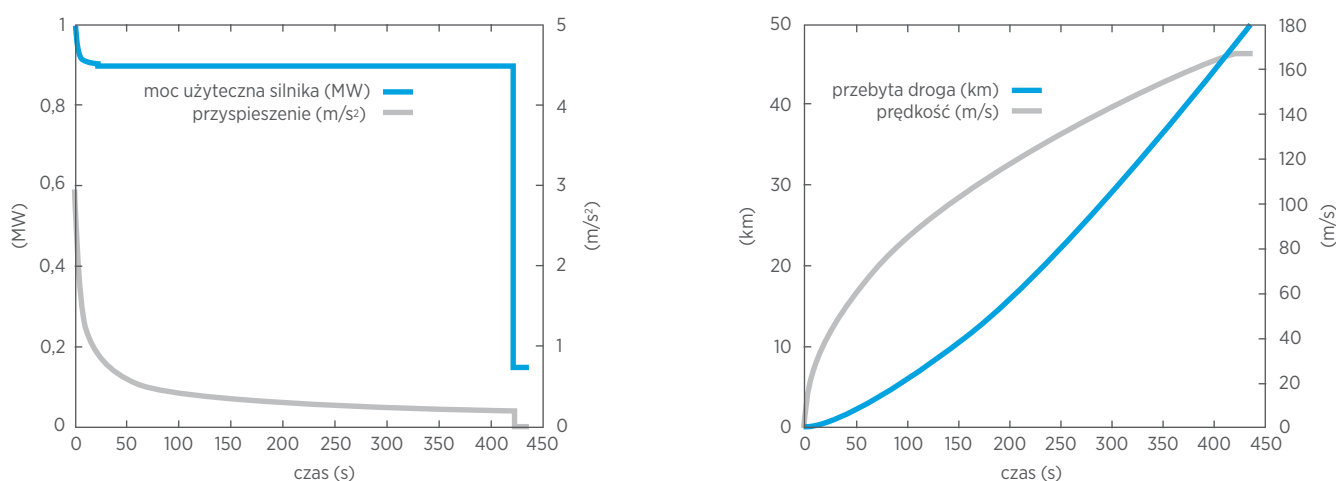
NAPĘD

KILKA ZESPOŁÓW WSKAZAŁO JAKO SPOSÓB NAPĘDZANIA POJAZDU ZASTOSOWANIE SILNIKA LINIOWEGO

Odwracając obliczenia, aby rozpędzić taki pojazd do zadanej prędkości przy podanych wyżej założeniach i dysponując silnikiem o mocy 1 MW (niektóre zespoły deklarowały chęć zasilania bateryjnego i dostępne do wykorzystania moce ciągle były tam znacznie mniejsze) potrzeba aż 40 km i prawie 6 minut.

Jeżeli uwzględnimy bardziej realistyczne, choć wciąż bardzo optymistyczne, założenia i przyjmujemy opory toczenia 1:500 oraz opory powietrza zmieniające się kwadratowo w funkcji prędkości tak, aby przy prędkości 600 km/h wynosiły one 360 N (opór jak dla poruszającej się kuli o średnicy 3 m w ciśnieniu 1 kPa z pominięciem efektów wynikających z obecności tunelu) oraz założymy sprawność napędu (czyli silnik, przesył energii, falowniki) 90%, układ zdolny do dostarczenia 1 MW potrzebuje ponad 47 km na rozpędzenie pojazdu, natomiast moc strat wynikająca z oporów ruchu dla prędkości docelowej wyniesie ok 143 kW, (por. rys. 2).

Wartości podane powyżej są wartościami bardzo optymistycznymi. W przypadku zastosowania lewitacji magnetycznej, moc strat znacząco wzrośnie, podobnie w przypadku zastosowania gorszej próżni. Również fakt, że kapsuła porusza się w tunelu, może istotnie wpłynąć na opory ruchu, szczególnie w przypadku, gdyby brać pod uwagę prędkości rzędu 1200 km/h (rozważano taką prędkość maksymalną). Niektóre zespoły rozważały również chęć rozpędzenia składu o masie ok. 300 t. Moc potrzebna do rozpędzenia go będzie proporcjonalnie większa. Rzeczywiste moce potrzebne na rozpędzenie pojazdu na odcinku do 20 km wyniosą od ok. 4 MW z mocą potrzebną na utrzymanie prędkości rzędu 150 kW przy zachowaniu umiarkowanej próżni i relatywnie niskich oporów toczenia i kapsuły o masie ok. 25 t do wartości mogących przekroczyć 60 MW i mocy potrzebnej na utrzymanie prędkości rzędu 2,5 MW dla składów o masie 300 t, przy zastosowaniu lewitacji



Rys. 2. Lewy: Moc dostarczana do napędu pojazdu i odpowiadające jej przyspieszenie w funkcji czasu. Prawy: zmiana prędkości w czasie oraz przebyta droga, odpowiadająca warunkom przedstawionym na lewym obrazku. Na rozpędzenie omawianego pojazdu do prędkości 600 km/h (167 m/s) potrzeba ponad 47 km oraz napędu o mocy użytecznej 900 kW (dostarczonej około 1 MW).

magnetycznej EDS o wysokiej sprawności. W przypadku zamiaru rozpędzania kapsuły do 1200 km/h wartości te będą istotnie większe.

Kilka zespołów wskazało jako sposób napędzania pojazdu zastosowanie silnika liniowego, który zazwyczaj połączony był z poruszaniem się z wykorzystaniem lewitacji magnetycznej (zastosowanie silnika liniowego może być połączone również z poruszaniem się na kołach). Zespoły najczęściej nie precyzowały jaki konkretnie typ silnika mają na myśli, w jaki sposób miałyby on być sterowany, nie wskazywały również na problemy związane z tym sposobem napędu.

W przypadku napędu silnikiem liniowym mamy do dyspozycji przynajmniej dwie technologie. Pierwsza zakłada zastosowanie silnika synchronicznego, w którym wykorzystane są magnesy trwałe w rotorze (odpowiednikiem rozwiniętego rotora jest część znajdująca się w części silnika znajdującego się w kapsule). W tym rozwiązaniu prędkość zmian pola magnetycznego stojana (znajdującego się w torze) musi być zsynchronizowana z pojazdem. Zaletą tego rozwiązania jest stałe, z punktu widzenia kapsuły, pole magnetyczne i związany z tym brak prądów wirowych w części kapsuły. W tym przypadku praktycznie całe ciepło wydziela się w torze i jest relatywnie łatwe do odprowadzenia do otoczenia. W przypadku hamowania, silnik ten zachowuje się jak klasyczny generator z magnesami trwałymi i hamowanie odbywa się z odzyskiem energii.

Drugim rozwiązaniem jest zastosowanie indukcyjnego silnika liniowego, którego zasada działania jest analogiczna do działania klasycznego trójfazowego silnika indukcyjnego asynchronicznego – w takim przypadku, w wirniku (w kapsule) występuje tak zwany poślizg, który powoduje wydzielanie się strat w postaci ciepła w kapsule, które może być trudne do odprowadzenia. Jeśli zostanie wybrany taki napęd, należy przeanalizować, czy będzie to wartość problematyczna do odprowadzenia, czy też nie. Zaletą takiego rozwiązania jest większa odporność napędu na drobne błędy w sterowaniu, wynikająca przede wszystkim z braku konieczności synchronizacji oraz względna prostota układu sterowania.

Hamowanie może się odbywać na dwa sposoby. Pierwszym sposobem jest hamowanie w stałym polu magnetycznym. W takim przypadku energia wydzieli się w postaci ciepła w kapsule, co może być dużym problemem lub energia może być odebrana od pojazdu na zasadzie działania prądnicy asynchronicznej.

Alternatywnym rozwiązaniem jest zastosowanie rozwiązań znanych z silników elektrycznych, ze wzbudzeniem hybrydowym, czy silników reluktancyjnych. Zespoły, które mówiły o wybranym sposobie napędu, nie omawiały jednak takiej możliwości. Niektóre

zespoły wskazywały napęd liniowy synchroniczny trójfazowy jako wybrany sposób napędzania pojazdu, co zdaje się być dobrym wyborem w przypadku silnika liniowego, przede wszystkim ze względu na pominalne straty wydzielające się w kapsule.

6.3 SYSTEM DOSTARCZANIA ENERGII

Głównym parametrem systemu zasilania jest moc, którą zdolny jest on dostarczyć. W przypadku, gdy system zasilania ma ograniczone zasoby energetyczne (zasilanie bateryjne) istotna jest również ilość energii, którą system jest w stanie dostarczyć.

Rozważmy już wcześniej zaproponowany przykład pojazdu o masie 25 t. Do uzyskania prędkości 600 km/h na dystansie rzędu 10 km potrzeba mocy użytecznej przynajmniej 3,9 MW, zatem warto przyjąć, że system zasilania musi dostarczyć przynajmniej 5 MW (nadal dość optymistyczne założenia), podczas rozpędzania kapsuły i kilkaset kW (wartość ściśle zależy od oporów, realistycznie ok. 100-500 kW) na utrzymanie prędkości. W przypadku, gdy w torze ma jednocześnie poruszać się wiele kapsuł, moce te muszą być odpowiednio większe. System powinien również mieć zdolność oddania energii hamowanych kapsuł do sieci energetycznej lub jej magazynowania i późniejszego wykorzystania.

W celu oszacowania ilości energii potrzebnej na rozpędzenie kapsuły i utrzymanie jej prędkości założono:

- opory toczenia 1:500 oraz opory powietrza zmieniające się kwadratowo w funkcji prędkości tak, aby przy prędkości 600 km/h wynosiły 360 N,
- sprawność energetyczną 90%; przy dostępnej mocy 5 MW potrzebna ilość energii na pokonanie odcinka 150 km wynosi 520 MJ ~ 145 kWh; zakładając moc 0 podczas hamowania, energia odzyskana podczas hamowania i tak musi być wcześniej dostarczona przez system.

Średnia moc takiego pojazdu podczas podróży wynosi ok. 500 kW (przy założeniu braku odzysku), natomiast przy założonym modelu, można odzyskać do ok. 65% włożonej energii.

Niektóre zespoły rozważają zasilanie akumulatorowe jako zasilanie napędu kapsuły. Inne zespoły rozważały też pomocnicze zasilanie bateryjne dla systemów w kapsule (w tym lewitacji), ale z pominięciem układu napędowego – takie rozwiązanie powinno być możliwe do wykonania bez większych problemów technologicznych. Zakładając, że użyte zostaną akumulatory o pojemności właściwej ok. 265 Wh/kg (górna granica dla Li-ion) – potrzeba przynajmniej 550 kg samych ogniw, aby przebyć 150 km podróży dwudziestopięcioletnią kapsułą. Ogniwa takie mogłyby dostarczyć jedynie 186 kW mocy nominalnej bowiem granica dla Li-ion, według Wikipedii, wynosi 340 W/kg. Zatem moc nominalna byłaby wystarczająca jedynie

do pokonania oporów ruchu. Kapsuła nie mogłaby osiągnąć swojej maksymalnej prędkości podczas tej podróży. Warto przypomnieć, że dysponując 1 MW potrzeba ok. 46 km na rozpędzenie takiej kapsuły.

Aby osiągnąć maksymalną prędkość na odcinku 10 km (zatem wymagając 4 MW mocy w czasie 90 s) i dopuszczając 400% przeciążenia ogniwi w tym czasie, potrzeba ponad 2900 kg ogniwi Li-ion. W takim przypadku ilość ogniwi dyktowana jest przez zapotrzebowanie na moc chwilową, nie zaś przez zapotrzebowanie energetyczne. Chcąc zmniejszyć liczbę ogniwi, można zastosować ogniwa, które mają lepsze parametry, stosując rozwiązanie hybrydowe. Można zastosować połączenie ogniwi o dobrej pojemności energetycznej z ogniwami o mniejszej pojemności, ale zdolnymi do dostarczenia dużej mocy. Takie rozwiązanie nie było jednak proponowane przez żaden zespół.

Rozwiązanie opierające się na akumulatorach powinno być więc możliwe do wykonania, ale ma następujące wady:

- ogniwa naturalnie łączą się z napędem kołowym – w tym przypadku wszystkie grzejące się elementy (akumulatory, silnik, falowniki) znajdują się wewnątrz kapsuły. Konieczne jest wyprowadzenie (bądź zgromadzenie) dużych ilości energii cieplnej. Średnia moc wydzielanego ciepła będzie wynosiła ponad 50 kW. Oddanie tej energii do otaczającej atmosfery może być problematyczne, chyba że zastosowane jest wyższe ciśnienie, ale wtedy moc strat również rośnie. Wypromieniowanie energii może być również trudne ze względu na relatywnie małą powierzchnię kapsuły. Istnieje możliwość zastosowania złożonego systemu pomp ciepła w celu zwiększenia gradientu temperatur, ale to będzie się wiązało ze zwiększonym zapotrzebowaniem energetycznym,
- ogniwa mają ograniczoną żywotność, ich pojemność i wydajność energetyczna maleje wraz z wiekiem (starsze ogniwa mogą się bardziej grzać), konieczna jest wymiana zużytych ogniwi na nowe, a utylizacja starych generuje dodatkowe koszty.

Ogniwa mają również swoje zalety. Są to:

- uproszczenie systemu zasilania,
- uniezależnienie się od ewentualnych zaników napięcia w sieci energetycznej,
- brak konieczności stosowania potencjalnie kosztownej infrastruktury przekazującej zasilanie do kapsuły lub napęd liniowy. W przypadku ogniwi, infrastruktura jest najtańsza.

W przypadku zasilania bateryjnego należy zweryfikować nie tylko ilość ciepła, wydzielanego na ogniwach i ich chłodzenie, ale również, czy ilość energii zgromadzonej w nich, jest wystarczająca oraz czy moc, którą mogą dostarczyć/przyjąć ogniwa, jest dostateczna.

Zasilanie zewnętrzne typu pantograf i dodatkowa szyna są narażone na dodatkowe niebezpieczeństwo wyładowania jarzeniowego w niskim ciśnieniu. Ewentualne zastosowanie tych rozwiązań w niskim ciśnieniu będzie wymagało dalszych prac oraz koniecznych modyfikacji z zastrzeżeniem, że mogą być one całkowicie niestosowalne dla pewnych (niskich) poziomów próżni.

Przekazywanie energii indukcyjnie wiąże się z problemami związanymi z koniecznością ekranowania pola magnetycznego od wnętrza kapsuły i może być nieuzasadnione w przypadku wyboru napędu kołowego.

6.4 TUNEL PRÓŻNIOWY

Tunel próżniowy jest kluczowym elementem Kolei Niskociśnieniowej. Tunel stanowi barierę oddzielającą środowisko zewnętrzne od toru, pozwala na odpompowanie powietrza z jego wnętrza i na poruszanie się pojazdu (kapsuły) po torze jeśli jest wymagane przez zawieszenie pojazdu. Kapsuła może poruszać się po torze wewnątrz tunelu lub bezpośrednio po wyprofilowanej powierzchni tunelu. Ciśnienie w tunelu jest obniżone ze względu na ograniczanie oporów aerodynamicznych pojazdu, które są głównym źródłem oporów i start w transporcie. Niskie ciśnienie w tunelu pozwala zużyć znacznie mniej energii dla przetransportowania pojazdu w porównaniu z transportem tego samego pojazdu z tą samą prędkością w warunkach normalnego ciśnienia lub na przemieszczenie tego pojazdu z dużo większą prędkością przy tym samym koszcie energetycznym. Opór aerodynamiczny jest proporcjonalny do ciśnienia, więc, teoretycznie, np. obniżając ciśnienie 10 razy (do 0,1 atm) opory ruchu przy tej samej prędkości powinny być 10 razy mniejsze (nie uwzględniono tutaj negatywnego wpływu tunelu na opór aerodynamiczny, o czym szerzej poniżej, w podpunkcie „g”). W rzeczywistości ten zysk może być niższy ze względu na dodatkowy wzrost oporu, wynikającego z poruszania się w tunelu. Z odpowiedzi uzyskanych od zespołów wynika, że rozważają one dość szeroki przedział ciśnienia, które ma panować w tunelu i wynosi on od 10 kPa (0,1 atm) do ~ 1 Pa (0,00001 atm), przy czym większość zespołów proponowała ciśnienie nie mniejsze niż 100 Pa (0,001 atm). Zespół Ekspertów uważa, że nie ma uzasadnienia dla stosowania w tunelu ciśnienia niższego niż 100 – 1000 Pa, ponieważ zapewnia ono obniżenie oporów ruchu przynajmniej 100 razy. Tym samym inne opory zaczynają być dominujące, więc oszczędności wynikające z dalszego zwiększania próżni są znikome. Obniżanie ciśnienia do niższych poziomów wiąże się natomiast z dodatkowymi problemami i wymaga bardziej kosztownej instalacji próżniowej, większych nakładów

energii na utrzymanie ciśnienia oraz droższych materiałów konstrukcyjnych (por. rys. 3).

Budowa tunelu, który pozwoli na wytworzenie w nim podciśnienia, wiąże się z szeregiem problemów i trudności technologicznych, które należy rozwiązać i uwzględnić w konstrukcji tego obiektu. Są to, między innymi, następujące kwestie:

a) wytrzymałość

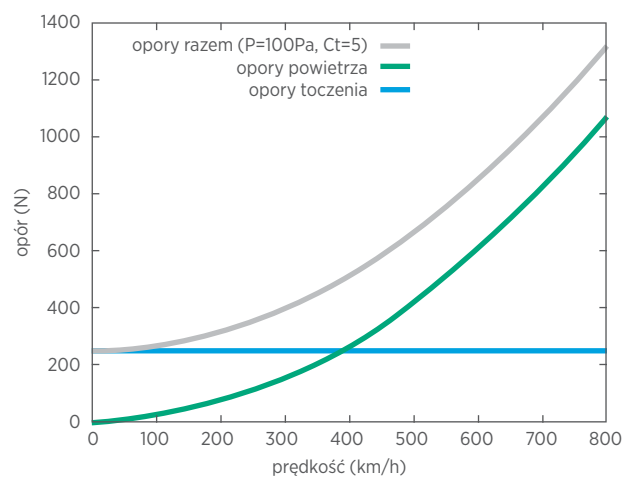
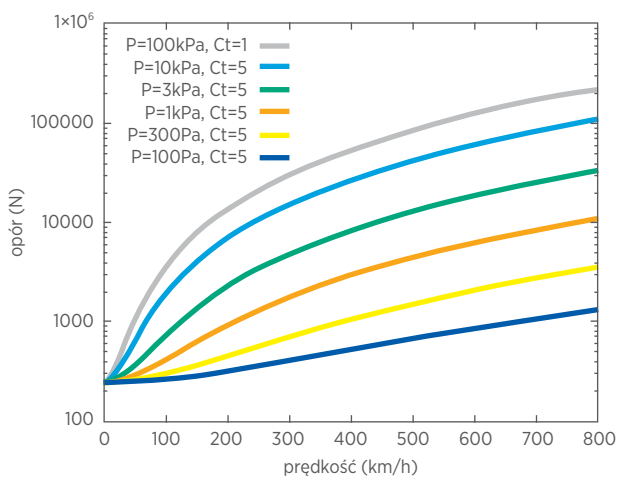
Tunel musi wytrzymać nacisk powietrza na jego ścianki. Ciśnienie działające na tunel jest relatywnie małe, bo będzie wynosiło niecałą atmosferę, jednak tunel będzie mieć średnicę przynajmniej 3 m (do nawet 5 - 8 m średnicy rozważają zespoły). Podciśnienie, w odróżnieniu do nadciśnienia, wymaga znacznie wytrzymalszej konstrukcji dla tej samej wartości bezwzględnej ciśnienia. Wynika to z innej mechaniki zniszczenia zbiornika (zapadanie konstrukcji). Cena rur próżniowych zwykle rośnie z kwadratem średnicy. Istnieją technologie pozwalające budować cienkościenne rury próżniowe o dużych średnicach. Rury takie posiadają wzmocnienia w postaci dodatkowych elementów (np. wewnętrznych pierścieni) lub poprzez wyprofilowanie powierzchni rury w postaci karbów (np. spiralne wyoblenia). Budowa tunelu podciśnieniowego o długości dziesiątek, czy nawet setek kilometrów jest dużym wyzwaniem technologicznym. Może okazać się ekonomicznie uzasadnione pozyskanie technologii umożliwiającej ciągłą budowę tunelu w docelowym miejscu z podstawowych surowców (np. szpul blachy). Maszyna taka mogła by przetłaczać, zawijać i spawać blachę w gotową konstrukcję rury, później pokrywać materiałem odpornym na warunki atmosferyczne (jeśli konieczne) i instalować potrzebną armaturę.

b) problemy materiałowe związane z gazowaniem

W warunkach obniżonego ciśnienia wiele materiałów ma tendencję do gazowania. Problem gazowania jest mocno uzależniony od poziomu próżni, w której ma przebywać dany materiał. Uwalnianie gazu przez materiał wiąże się z dwoma negatywnymi skutkami. Po pierwsze, uwalniany gaz psuje próżnię i należy go usuwać. Niektóre materiały mogą gazować nawet przez kilka lat, co wiąże się z kosztami utrzymywania ciśnienia w tunelu. Przykładem może być wilgotny materiał, który zostałby użyty do budowy tunelu. Drugim negatywnym skutkiem jest możliwość usuwania pożądanych lotnych składników materiałów na skutek gazowania. Przykładem może być wysychanie smarów lub proces twardnienia tworzyw sztucznych na skutek odparowania plastyfikatorów z ich objętości.

c) system śluz i niezbędnej armatury próżniowej dla wielokilometrowego tunelu

Względy bezpieczeństwa wymagają systemu śluz, które będą umożliwiały odcięcie uszkodzonego fragmentu tunelu. Śluzy lub wyspecjalizowane włazy są niezbędne do wymiany pasażerów lub załadunku/ wyładunku z kapsuł bez niszczenia próżni w tunelu. Rozjazdy są kolejnym elementem, który powinien zawierać śluzy bezpieczeństwa, które odcinałyby uszkodzone lub remontowane fragmenty toru. Nie ma obecnie na rynku gotowych rozwiązań tego typu przegród, jednak technologia potrzebna do ich skonstruowania jest znana. Można podejrzewać, że śluzy będą kosztownym elementem systemu i w przypadku dużej ich liczby mogą być porównywalne cenowo z głównym tunelem.



Rys. 3. Lewy: Wzrost oporu ruchu z prędkością dla różnych ciśnień; $C_t = 1$, oznacza przypadek w otwartej przestrzeni; $C_t = 5$, oznacza przypadek w tunelu próżniowym z uwzględnieniem 5-cio krotnego wzrostu sił oporu. Prawy: porównanie udziału oporów toczenia oraz oporów ruchu dla kapsuły poruszającej się w tunelu. Dla prędkości około 400 km/h opory powietrza (ruchu) zaczynają przewyższać opory toczenia.

d) odporność na wahania temperatury

Wielokilometrowy tunel, a przynajmniej jego zewnętrzna część, będą podlegać dobowym oraz rocznym wahaniom temperatury. Będzie to powodować rozszerzanie i kurczenie elementów tunelu, które muszą zapewnić idealną szczelność. Ponadto w warunkach polskich mogą występować niewielkie ruchy tektoniczne, które również mogą wpływać na deformację tunelu. Ze względu na wymaganą szczelność tunelu, nie może on posiadać dylatacji, dlatego zespoły proponują następujące rozwiązania tego problemu:

- mieszki kompensacyjne;
- stosowanie materiałów o niskiej rozszerzalności cieplnej;
- zastosowanie izolacji termicznej w zewnętrznej części tunelu oraz utrzymywanie stałej temperatury w części wewnętrznej;
- elastyczne uszczelnienie przesuwnych elementów tunelu.

W przemyśle najpopularniejszym rozwiązaniem są mieszki kompensacyjne oraz coraz częściej stosowane materiały o niskiej rozszerzalności cieplnej. Zespół Ekspertów twierdzi, że może to być jeden z trudniejszych problemów do rozwiązania. Materiały o niskiej rozszerzalności cieplnej są kosztowne i w przypadku wielokilometrowego tunelu tylko zmniejszą liczbę potrzebnych mieszkań kompensacyjnych. Mieszki kompensacyjne mogą okazać się niezbędnym elementem tunelu. Elementy te, ze względu na duże obciążenia zmęczeniowe są potencjalnie najbardziej zawodnym elementem tunelu, np.: w rurociągach kriogenicznych, najczęstszym miejscem występowania awarii są właśnie mieszki kompensacyjne. Ryzyko związane z uszkodzeniem mieszkań można zmniejszać stosując np. podwójny system (zewnętrzne oraz wewnętrzne) mieszkań oraz monitorować stan mieszkań i wymieniać elementy w przypadku wykrycia nawet niewielkich uszkodzeń. Rozwiązaniem pozwalającym zrezygnować z mieszkań kompensacyjnych jest wykorzystanie wyprofilowanej rury (np. spiralne karbowanie). W tym przypadku cała długość rury pełni zadanie kompensacji wydłużenia odkształcając się w znacznie mniejszym zakresie niż typowe mieszki kompensacyjne.

e) wpływ obniżonego ciśnienia na odbieranie ciepła od kapsuły

Silniki elektryczne w wózkach napędowych pojazdów chłodzone są powietrzem. W przypadku obniżenia ciśnienia, spada efektywność odprowadzania ciepła w ten sposób. Efekt pogarszania chłodzenia jest tym większy,

im bardziej obniżone zostanie ciśnienie. Dla ciśnienia ~ 10 kPa (0,1 atm) chłodzenie jest o połowę gorsze niż w warunkach atmosfery. Dla ciśnienia ~ 1 kPa (0,01 atm) chłodzenie jest już ponad 5 razy gorsze. Dodatkowo efekt chłodzenia jest pogarszany faktem, że dla niskich ciśnień masa powietrza w tunelu, z którą może mieć kontakt chłodzony element jest niewielka, a co za tym idzie pojemność cieplna tego powietrza może być niewystarczająca do odebrania ciepła. Problem chłodzenia jest najbardziej istotny w przypadku napędu w kapsule oraz bardzo niskiego ciśnienia w tunelu.

f) wyładowanie jarzeniowe w warunkach niskiego ciśnienia

W warunkach niskiego ciśnienia może pojawić się wyładowanie jarzeniowe, co uniemożliwi przekazywanie energii do kapsuły za pomocą wysokonapięciowego pantografu. Stosowanie natomiast niskiego napięcia wiązałoby się z koniecznością przepływu dużych prądów, co może powodować duże straty oraz wydzielanie się ciepła w przewodnikach i elementach kontaktowych pantografów. Dodatkowo, koszty materiałowe na przewodniki byłyby znacznie większe. Z tych powodów Zespół Ekspertów twierdzi, że zasilanie z pantografu jest tylko możliwe dla niskich poziomów ciśnienia w tunelu, w pozostałych przypadkach wiąże się z nim zbyt dużo komplikacji.

g) opór ruchu w tunelu

Ze względu na ograniczoną przestrzeń opór ruchu pociągu, poruszającego się w tunelu jest większy od oporu ruchu pociągu, poruszającego się w otwartej przestrzeni. Jest to związane zarówno ze wzrostem oporów pochodzących od tarcia jak i ciśnienia. Wielkość tego wzrostu zależy zasadniczo od wielu czynników, między innymi od długości pociągu i tunelu, przekroju aerodynamicznego (w tym współczynnika blokowania tunelu β , zdefiniowanego jako stosunek pola przekroju poprzecznego pociągu do pola przekroju tunelu), tarcia (porowatości) o pociąg i ściany tunelu, konstrukcji pociągu i tunelu, efektów falowych, lokalnych warunków pogodowych, a także możliwej interferencji z innymi pociągami. Efekty falowe, związane ze ściśniętością powietrza, powstają przed poruszającym się pociągiem na skutek efektu tłokowego (fala ciśnieniowa propaguje wzdłuż tunelu z prędkością dźwięku) oraz w tylnej części pociągu, gdzie może pojawić się fala uderzeniowa (na skutek lokalnego wzrostu prędkości powietrza, powyżej prędkości dźwięku). W przypadku tuneli o obniżonym ciśnieniu, ten efekt może być znacząco wzmocniony, gdyż fala ciśnieniowa (powstająca na skutek efektu tłokowego), ulega odbiciu na końcu tunelu i wraca do poruszają-

cego się pociągu, zwiększając opór ruchu oraz prawdopodobieństwo wystąpienia przepływu dławionego w tylnej części pociągu. Efekty te są ściśle związane z wielkością przekroju tunelu (współczynnik β) oraz długością pociągu. Z badań¹ wynika, iż pociąg poruszający się z prędkością około 100 m/s w tunelu o $\beta \sim 0,5$ i ciśnieniu 0,1 atm będzie podlegał podobnym oporom ruchu, co podobny pociąg poruszający się w otwartej przestrzeni. Można więc przyjąć, że opory ruchu w tunelu mogą być od 5 do 10 razy większe niż w otwartej przestrzeni, oraz silnie zależą od wartości β oraz konstrukcji tunelu.

h) rozszczelnienie tunelu

Należy mieć na uwadze, że w wielokilometrowym tunelu, z którego odpompowane zostanie powietrze, zgromadzona zostanie duża egzergia (zdolność do wykonania pracy), która może zostać uwolniona natychmiast, w przypadku uszkodzenia tunelu. Dla 10 km tunelu próżniowego o średnicy wewnętrznej 5 metrów energia ta wynosi prawie 16 GJ, co odpowiada równoważnikowi detonacji 3,8 ton TNT. Stwarza to niebezpieczeństwo dla ludzi i kapsuły, w której się znajdują.

i) rozszczelnienie kapsuły

W przypadku rozszczelnienia kapsuły znajdującej się w tunelu o obniżonym ciśnieniu istnieje ryzyko śmierci pasażerów na skutek uduszenia. Duża część systemów bezpieczeństwa ma za zadanie niwelować ryzyka związane z tą ewentualnością. Są to np. maseczki tlenowe (analogiczne do systemów stosowanych w lotnictwie), systemy awaryjnego zapowietrzania tunelu czy systemy awaryjnego usuwania kapsuły z tunelu.

j) system podtrzymywania próżni

W punkcie h wskazano, że egzergia 10 km tunelu jest rzędu 16 GJ (4,4 MWh). Oznacza to, że w celu wypompowania powietrza z tego tunelu będziemy musieli wykorzystać kilkukrotnie większą energię (dokładna wartość jest uzależniona od poziomu próżni oraz sprawności pomp próżniowych). Jest to jednak jednorazowy wydatek energii na każde zapowietrzenie tunelu. Zdecydowana większość instalacji próżniowych wymaga jednak aktywnego systemu podtrzymywania próżni. Wynika to z faktu, że połączenia różnych materiałów nigdy nie są idealnie szczelne, muszą zapewniać przenikliwość gazu przez połączenie na akceptowalnym poziomie dla danego rozwiązania. Połączenia ruchome, np. zawory i śluzę są zdecydowanie trudniejsze w uszczelnieniu od połączeń nieruchomych. Kolejnym czynnikiem wpływającym na niszczenie próżni jest gazoprzepuszczalność materiałów, która np. dla

materiałów porowatych takich jak beton jest zdecydowanie większa niż dla elementów stalowych. Dodatkowo, materiały znajdujące się w tunelu mogą uwalniać z siebie gazy, co również przyczynia się do niszczenia próżni. Przykładowo, 1 kg wody w tunelu (np. w postaci wilgotnego materiału) wymaga odpompowania z tunelu o ciśnieniu 500 Pa aż 270 m³ pary wodnej. Również wycieki lub zabrudzenia z kapsuły mogą wpływać destrukcyjnie na próżnię w tunelu. Wymienione powody wymagają stałej lub cyklicznej pracy pomp próżniowych, w celu utrzymania zakładanego poziomu podciśnienia w tunelu. Jakość zastosowanych materiałów i wykonanych połączeń oraz zakładany poziom próżni ma główny wpływ na poziom przecieków, a tym samym na koszty związane z utrzymaniem próżni.

k) wielkość tunelu

Największą pod względem długości instalacją próżniową w skali globalnej jest izolacja próżniowa Wielkiego Zderzacza Hadronów (LHC). Akcelerator o kołowym kształcie o całkowitej długości ok. 27 km jest umieszczony w rurze stalowej o średnicy ok. 1 metra. Objętość instalacji próżniowej dla Kolei Niskociśnieniowej może być nawet o 3 rzędy wielkości większa i będzie wymagała optymalizacji praktycznie wszystkich podzespołów oraz wielu nowych i innowacyjnych rozwiązań inżynierskich, tak aby koszt tunelu został utrzymany w akceptowalnym ekonomicznie przedziale. Jednym ze sposobów wyceny kosztu budowy tunelu Kolei Niskociśnieniowej jest przeskalowanie z kosztów instalacji próżniowej LHC prowadzące do estymacji na poziomie 10 tys. EUR na metr bieżący tunelu. Kwota ta nie obejmuje robót ziemnych i budowlanych.

Powyżej zostały wymienione główne problemy techniczne, które należy rozwiązać przed rozpoczęciem budowy tunelu KNC. Obecnie dostępne są technologie pomp próżniowych, zaworów, mieszków kompensacyjnych, przepustów gazoszczelnych i pozostałej armatury próżniowej niezbędnej do budowy tunelu. Największymi wyzwaniem będzie zapewnienie bezpieczeństwa pasażerom oraz problemy wynikające ze skali instalacji próżniowej. Pomimo, że przemysł pomp, zaworów i armatury próżniowej jest dojrzały, to w przypadku budowy tak olbrzymiej instalacji optymalnym może okazać się opracowanie szeregu nowych rozwiązań. Przykładem może być zastosowanie pomp próżniowych zoptymalizowanych do pracy przy zakładanym ciśnieniu w tunelu, co pozwoli znacząco podnieść sprawność wytwarzania i utrzymywania próżni.

Podstawową zaletą tunelu próżniowego jest ograniczenie energochłonności transportu. Dodatkowo

**ELEMENTY KNC SĄ
W WIĘKSZOŚCI DOSTĘPNE
I Z POWODZENIEM
WYKORZYSTYWANE
W PRZEMYSŁE
TRANSPORTOWYM,
PRÓŻNIOWYM
ORAZ BUDOWLANYM**

tunel zapewnia izolację od środowiska zewnętrznego. Transport kapsuł w tunelu będzie wysoce zautomatyzowany, więc dla dobrze zaprojektowanego systemu można minimalizować błędy ludzkie. Tym samym technologia ma potencjał do stania się bardziej bezpieczną od transportu lotniczego. Kolejną zaletą jest izolacja kapsuł i toru jazdy od warunków atmosferycznych. Powinno to zwiększyć bezpieczeństwo, niezawodność i długowieczność KNC.

6.5 WNIOSKI

Elementy składowe technologii KNC są w większości dostępne i z powodzeniem wykorzystywane w przemyśle transportowym, próżniowym oraz w budownictwie. Główną trudnością i wyzwaniem jest integracja elementów składowych KNC w jeden

system transportu. Wiąże się to z pojawieniem się licznych nowych problemów, których rozwiązanie nie jest obecnie znane.

Trudności związane z integracją systemu KNC są bezpośrednio związane z żądanym poziomem próżni. Uzasadnionym jest założenie, iż obecnie istniejące rozwiązania mogą być wykorzystane, po drobnej modyfikacji, w próżni rzędu 1000 Pa, natomiast próżnia głęboka (~ 1 Pa) będzie wymagała znaczących modyfikacji oraz może powodować występowanie kolejnych problemów (np. gazowanie powłoki tunelu, szczelność łożysk, odprowadzanie ciepła, itd.). Możliwość uzyskania prędkości powyżej 600 km/h wydaje się nieuzasadniona ekonomicznie, szczególnie w przypadku odległości między największymi miastami w Polsce. Potwierdzają to także założenia najbardziej zaawansowanych zespołów, gdyż nie rozważają one wyższych prędkości.

¹Halvor S. Hansen, Muhammad Umer Nawaz, Nils Olsson, Using operational data to estimate the running resistance of trains. Estimation of the resistance in a set of Norwegian tunnels, Journal of Rail Transport Planning & Management, Volume 7, Issues 1-2, 2017, Pages 62-76, <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2017.01.002>.

Arturo Baron, Michele Mossi, Stefano Sibilla, The alleviation of the aerodynamic drag and wave effects of high-speed trains in very long tunnels, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 89, Issue 5, 2001, Pages 365-401, [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(00\)00071-4](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(00)00071-4)
Michele Mossi, Stefano Sibilla, Swisstrometro: aerodynamic drag and wave effects in tunnels under partial vacuum, dokument dostępny on-line.

7. MOŻLIWE KONFIGURACJE KNC

Koncepcje i konfiguracje KNC



Warianty konfiguracji KNC zostały przedstawione na schemacie powyżej.

Ciekawą i być może wartą rozważenia konfiguracją, która nie została wprost omówiona przez żadan zespół, jest połączenie poruszania się na kołach, z zastosowaniem napędu liniowego, przynajmniej w obszarach rozpędzania/hamowania pojazdu.

Takie rozwiązanie łączy zalety wynikające z niskich oporów ruchu na kołach i zalety silnika liniowego, tj. prosty sposób przekazania z zewnątrz energii potrzebnej do rozpędzenia pojazdu i brak problemów z odprowadzaniem ciepła. Celem redukcji kosztów napęd liniowy nie musiałby być prowadzony przez całą długość tunelu. Mógłby służyć tylko do rozpędzania pojazdu a na potrzeby pokonania oporów ruchu, mógłby być wykorzystany klasyczny napęd kołowy, dla którego zasilanie mogłoby być dostarczone z zewnątrz lub z systemu bateryjnego, zależnie od tego, które rozwiązanie byłoby uzasadnione ekonomicznie. Moce potrzebne do podtrzymania ruchu są istotnie mniejsze niż te potrzebne do rozpędzenia pojazdu.

Różnica jest na tyle duża, że w przypadku rozważanego przy omawianiu napędów pojazdu, o masie 25 t i łącznych oporach ruchu 610 N (250 N na opory toczenia i 360 N na opory aerodynamiczne) stosunek energii kinetycznej pojazdu do energii potrzebnej na pokonanie strat na odcinku 150 km wynosi prawie 4:1. Oznacza to ok. pięciokrotnie mniejszą ilość ciepła wydzielonego w kapsule, względem napędu z silnikami w pojeździe. Konieczna długość silnika liniowego w takim rozwiązaniu wynosi 1/15 długości całego toru, przy założeniu że silnik liniowy nie jest używany w obszarze hamowania kapsuły). Rozwiązanie takie, w połączeniu z napędem zasilanym bateryjnie, może dać dużą redukcję kosztów, szczególnie na krótkich odcinkach.

Wadą takiego rozwiązania jest konieczność zastosowania większej liczby systemów niż w przypadku, gdy cały tor wykonany jest w jednej technologii.

Omawiane rozwiązanie hybrydowe nie ma sensu, gdy opory ruchu są bardzo duże, ponieważ energia strat może być wtedy istotnie wyższa niż energia, którą mógłby dostarczyć silnik liniowy.

8.

NIEZBĘDNE KROKI W ROZWOJU KNC W POLSCE

8.1 TOR TESTOWY

Pierwszym, a na pewno niezbędnym, krokiem do rozwoju KNC w Polsce powinna być budowa toru testowego. Każdy zespół na świecie, rozwijający technologie KNC, dąży do zbudowania takiego toru. Tor testowy powinien zawierać wszystkie niezbędne elementy: łuk, rozjazd, śluzy, infrastrukturę do produkcji próżni a także odpowiednie przyłącze elektryczne. Długość toru powinna być wystarczającą do osiągnięcia zakładanej prędkości. Szacuje się ją na ok. 20 km, a w początkowej fazie na 1 km. Powstanie toru testowego KNC umożliwi badanie nie tylko technologii KNC, ale każdej innej, związanej z niskim ciśnieniem bądź próżnią albo wymagającej bariery ochronnej od środowiska zewnętrznego. Tor testowy powinien być zaprojektowany tak, aby mógł służyć także do badania innych technologii i zagadnień niż KNC. Dzięki temu, może być wykorzystany jako laboratorium do bardziej ogólnych zastosowań, jak np.: eksploatacja urządzeń w środowisku o obniżonym ciśnieniu, poruszanie się w środowisku o obniżonym ciśnieniu, wymiana ciepła w środowisku o obniżonym ciśnieniu. Przed ewentualnym wybudowaniem toru testowego zaleca się wykonanie analizy możliwości jego użycia do badania innych zagadnień niż KNC oraz potencjalnego wykorzystania do badań komercyjnych przez różne zespoły rozwijające technologię KNC oraz inne zespoły badawcze rozwijające technologie spoza KNC.

Tor testowy powinien być innym torem niż tor docelowy ze względu na charakter badań tam prowadzonych. Mogą być konieczne częste rekonfiguracje oraz

testy nowych kapsułów czy systemów napędu/zawieszenia lub systemów pomocniczych. Problemem może być uwzględnienie w konstrukcji toru testowego wszystkich szczegółowych rozwiązań technicznych, proponowanych przez zespoły.

Miejszem dogodnym do zlokalizowania toru testowego KNC jest teren w okolicy Żmigrodu, gdzie znajduje się tor testowy konwencjonalnej kolei, będący własnością PKP/Instytutu Kolejnictwa.

Z doświadczeń własnych ZE, w oparciu o koszty technologii kriogenicznych wiadomo, że koszt 1-go metra próżniowego rurociągu kriogenicznego, wraz z wewnętrznymi liniami procesowymi, wynosi około 6 000 EUR. Średnica toru testowego KNC jest znacząco większa od rurociągu kriogenicznego, ale uzasadnione jest, aby przyjąć, że jego koszt wzrośnie około dwukrotnie, co w przeliczeniu na 1 km daje koszt rzędu 10 mln EUR. Szacunek ten jest zgodny z wyceną zespołów.

8.2 HOMOLOGACJA

Wysoce zalecana jest współpraca zespołu rozwijającego KNC z jednostką certyfikacyjną od jak najwcześniejszego etapu rozwoju tego systemu. Zalecenie to nie dotyczy wczesnego etapu testowania rozwiązań technicznych, gdy prawdopodobieństwo zmian jest jeszcze dość wysokie. Wydaje się, że z racji doświadczenia jednostką szczególnie predestynowaną w Polsce do tej roli jest Instytut Pojazdów Szynowych „Tabor” z Poznania.

**PRĘDKOŚĆ
DO 600 KM/H
JAKO REALISTYCZNA
DO REALIZACJI
W WARUNKACH
POLSKICH**

9. PODSUMOWANIE RAPORTU

A. Cechy charakterystyczne KNC:

1. kapsuła (odpowiednik pojazdu/wagonu), lewitująca lub poruszająca się na kołach z prędkością ponad 400 km/h, w szczelnym tunelu/rurze, w której obniżono ciśnienie,
2. warianty zastosowania: transport pasażerski lub towarowy.

B. W trakcie pracy ZE zidentyfikowano 6 zespołów pracujących w Polsce nad następującymi rozwiązaniami:

1. kapsuły poruszające się na kołach z wewnętrznym systemem zasilania (akumulatory),
2. kapsuły poruszające się na kołach z zewnętrznym systemem zasilania (pantograf),
3. małe kapsuły wykorzystujące lewitację magnetyczną podtrzymywaną przez wewnętrzny system zasilania (akumulatory), ale napędzane energią z zewnątrz,
4. małe kapsuły wykorzystujące lewitację magnetyczną z zewnętrznym systemem zasilania,
5. składy wielokapsułowe.

C. Główną przesłanką dla rozwijania technologii KNC jest możliwość znaczącego obniżenia kosztów transportu, w tym kosztów inwestycyjnych, utrzymaniowych i środowiskowych przy jednoczesnym zwiększeniu prędkości eksploatacyjnej.

1. udowodnienie znaczącego obniżenia energochłonności KNC w stosunku do tradycyjnych środków transportu może mieć obecnie charakter wyłącznie teoretyczny z uwagi na brak instalacji KNC, eksploatowanej jako środek transportu osobowego lub towarowego. Zmniejszenie energochłonności jest związane bezpośrednio z obniżeniem ciśnienia otoczenia, co powoduje zmniejszenie oporu aerodynamicznego, będącego głównym źródłem strat w transporcie,
2. zespoły twierdzą, że koszt budowy kilometra KNC będzie o 10%–30% mniejszy niż torowiska kolei dużych prędkości (KDP). Koszty eksploatacji KNC mają być o 40%–85% niższe od kosztów eksploatacji KDP.

D. Obecnie na świecie dostępne są wszystkie składowe technologie/elementy, niezbędne do zbudowania KNC:

1. technologie tunelowe i mostowe,
2. technologie wytwarzania i podtrzymania niskiego ciśnienia,
3. technologie kolei dużych prędkości na kołach, osiągających prędkości testowe do 600 km/h i eksploatacyjne do 400 km/h (Francja),
4. technologie kolei dużych prędkości oparte na lewitacji magnetycznej osiągających prędkości testowe ponad 600 km/h i eksploatacyjne do 430 km/h (Japonia, Chiny).

E. Główną trudnością w budowie KNC jest integracja technologii i elementów wymienionych w punkcie D, która wiąże się z licznymi, dotychczas nierozwiązanymi problemami. Są to m.in:

1. odbiór dużej ilości ciepła w środowisku o obniżonym ciśnieniu,
2. utrzymanie próżni w wielkogabarytowych obiektach (długie tunele). Obecnie największą istniejącą instalacją próżniową jest instalacja rurowa akceleratora CERN w Genewie o długości 27 km. W przypadku KNC potrzebne są instalacje próżniowe o objętości kilka rzędów wielkości większej,
3. kwestie bezpieczeństwa, w szczególności gwarancja szczelności pojazdu, odpowiedni poziom tlenu, odporność tunelu na uszkodzenie i rozszczelnienie, działania, jakie trzeba podjąć, gdy zachodzi konieczność ewakuowania pasażerów z tunelu,
4. dostarczenie energii do zasilania pojazdu. Klasyczne rozwiązania typu pantograf mogą być problematyczne ze względu na niebezpieczeństwo powstania wyładowania jarzeniowego ze względu na niskie ciśnienie panujące w tunelu,
5. budowa rozjazdów umożliwiających zjazd kapsuły z zachowaniem dużej prędkości z głównego toru jazdy a potem powrót kapsuły na tor główny,
6. odpowiednia konstrukcja przystanków (stacji) dla KNC,
7. zapewnienie dużej przepustowości (zdolności przewozowej) KNC. Odpowiednio pojemne kapsuły powinny mieć możliwość poruszania się w tunelu z dużą częstotliwością,

8. nie do końca rozpoznany problem wzrostu oporu aerodynamicznego wynikający z poruszania się w tunelu z dużą prędkością.

F. Główne wnioski płynące z pracy ZE:

1. zespoły wskazały poziomy próżni odpowiednio dla KNC od 1 do 10 000 Pa. ZE uważa, że poziom próżni istotnie poniżej 100 Pa powoduje znaczący wzrost problemów (produkcja i utrzymanie próżni, szczelność tunelu, problemy materiałowe (gazowanie). Wątpliwy jest również zysk energetyczny spowodowany niewielkim udziałem oporów powietrza w oporze całkowitym,
2. maksymalna prędkość wskazana przez zespoły była rzędu 1000 km/h, jednak większość zespołów wskazała na prędkość do 600 km/h jako realistyczną do realizacji w obecnych warunkach technologicznych i logistycznych (odległości rzędu setek kilometrów, rzeźba i zagospodarowanie terenu w Polsce),
3. konieczność budowy toru testowego w celu przetestowania projektowanych rozwiązań.

G. Tor testowy:

1. do dalszego rozwoju technologii KNC niezbędna jest budowa toru testowego. Każdy zespół na świecie rozwijający technologie KNC, dąży do zbudowania toru testowego,
2. tor testowy powinien zawierać niezbędne elementy (łuk, rozjazd, minimalną długość pozwalającą na osiągnięcie pożądanego prędkości, śluzy, infrastrukturę do produkcji próżni, itd....),
3. ze względu na duże gabaryty toru testowego powinno się go umiejscowić z dala od dużych skupisk ludności,
4. tor testowy powinien mieć zapewnione odpowiednie przyłącze energetyczne,
5. powinna istnieć możliwość łatwego dostosowania toru testowego do badania innych technologii, wymagających środowiska o obniżonym ciśnieniu i/lub bariery ochronnej od środowiska zewnętrznego,
6. rekomendowana długość toru testowego: co najmniej 20 km (odcinek pilotażowy – 1 km, maksymalnie ok. 50 km),
7. możliwe miejsce budowy toru testowego: okolice Żmigrodu, tor testowy konwencjonalnej kolei, będący własnością PKP/Instytutu Kolejnictwa.

H. Homologacja KNC w Polsce:

1. wersja KNC z przeznaczeniem do przewozów towarowych może powstać znacząco szybciej i będzie tańsza w porównaniu do wersji pasażerskiej, która wymaga odpowiedniej homologacji,
2. przewidywany czas homologacji KNC do przewozów pasażerskich to około 10 lat (źródło informacji: Instytut Pojazdów Szynowych „Tabor”, Poznań).

I. Przewidywany czas realizacji KNC w Polsce:

1. większość polskich zespołów wskazało około 15 lat jako czas realizacji, licząc od momentu rozpoczęcia projektowania do momentu rozpoczęcia przewozu pasażerów. Założono, że po pięciu latach od rozpoczęcia projektowania, będzie można rozpocząć proces homologacyjny,
2. dla porównania warto podkreślić, że przewidywany czas realizacji nowej linii kolei dużych prędkości (High Speed Rail 2) w Anglii, odcinek Londyn – West Midlands to ok. 15 lat. Jest to czas od podjęcia decyzji o budowie do rozpoczęcia planowego kursowania pierwszych pociągów. Uwzględniono odpowiednią legislację oraz uzgodnienie pomiędzy rządem a opozycją, że projekt będzie realizowany bez przeszkód.

J. Przewidywane korzyści dla rozwoju polskiej gospodarki:

1. użyciu akumulatorów sprzyja rozpoczęcie produkcji w nowo powstającej pod Wrocławiem fabryce nowoczesnych akumulatorów LG Chem (przynajmniej dwa polskie zespoły biorą pod uwagę instalowanie akumulatorów na pokładzie kapsuły na potrzeby dostarczenia energii do napędzania kapsuły),
2. w Polsce co najmniej 2 firmy mają własne, udane konstrukcje sterowników typu BMS (*Battery Management Systems*) do akumulatorów,
3. polscy producenci łodzi i małych statków z tworzyw sztucznych dysponują dużym potencjałem projektowym i wytwórczym, który może zostać wykorzystany do produkcji kapsuł KNC,
4. zwiększony popyt może wygenerować produkcję w Polsce pomp próżniowych o odpowiednich parametrach,

5. tunele dla KNC mogą być budowane z prefabrykatów z betonu lub tworzyw sztucznych, produkowanych w Polsce,
6. inne technologie powstałe lub udoskonalone podczas projektowania KNC mogą stać się innowacyjnymi produktami lub usługami, których zastosowania wykrócą poza transport,
7. produkcja kapsuł poruszających się na kołach będzie zapewne wymagała komponentów ze stali. W Polsce działa trzech producentów pojazdów szynowych: PESA, NEWAG i Stadler, którzy będą mogli podjąć się produkcji kapsuł (pojazdów KNC).

K. Cechy szczególne obecnego etapu rozwoju KNC w Polsce:

1. zdecydowana większość zespołów wyłoniła się z uczelni technicznych (Politechniki: Warszawska, Wrocławska, Łódzka) i miała okazje zmierzyć się z zespołami z innych krajów, startując w międzynarodowych konkursach, ogłaszanych przez globalnych liderów KNC – Elona Muska i Richarda Bransona. Celem tych konkursów było zaprojektowanie różnych elementów KNC. Dobre rezultaty osiągnięte w tych konkursach oznaczają również gotowość do startowania w podobnych konkursach w Polsce, o ile będą one ogłoszone,
2. cechą szczególną wydają się być również ściśle związki trzech najbardziej zaawansowanych zespołów z uczelniami, stanowiącymi zaplecze merytoryczne m.in. w modelowaniu i projektowaniu,
3. polskie zespoły korzystają z finansowania prywatnego a także, w niewielkim zakresie, ze środków publicznych przeznaczonych na badania i rozwój, dostępnych m.in. w NCBR,
4. największą barierą do pokonania jest budowa toru testowego. Wydaje się, że bez współfinansowania tej inwestycji o charakterze B+R ze środków publicznych, nie jest możliwe powstanie KNC w Polsce.

Zespół Ekspertów na podstawie posiadanej wiedzy, korzystając z informacji pozyskanych od zespołów, określa poziom gotowości technologicznej dla KNC w Polsce na nie więcej niż 4.

**PODSTAWOWĄ ZALETĄ
TUNELU PRÓŻNIOWEGO
JEST OGRANICZENIE
ENERGOCHŁONNOŚCI
TRANSPORTU**

10.

WNIOSKI KOŃCOWE ORAZ REKOMENDACJE

1. Główną zaletą technologii KNC jest poruszanie się kapsuł w środowisku o obniżonym ciśnieniu, co pozwala na obniżenie nakładów energetycznych związanych z koniecznością pokonania sił oporu. Obniżanie ciśnienia powoduje liniowy (proporcjonalny) spadek sił oporu. Siła oporu wzrasta z kwadratem prędkości, natomiast moc potrzebna do pokonania siły oporu wzrasta z sześcianiem prędkości. Oznacza to, że efekt zastosowania próżni jest energetycznie odczuwalny dla każdej prędkości, jednak szczególnie korzystny dla prędkości wyższych (np. w środowisku o ciśnieniu 100-krotnie niższym niż ciśnienie atmosferyczne, pojazd poruszający się z prędkością 500 km/h będzie potrzebował teoretycznie tyle samo energii, na pokonanie takiego samego odcinka drogi, co pojazd poruszający się z prędkością 100 km/h w ciśnieniu atmosferycznym). Oznacza to, że technologia KNC może być już korzystna w przypadku pojazdów poruszających się z obecnie osiąganymi prędkościami przez istniejące koleje dużych prędkości.
2. Zaletą poruszania się pojazdu KNC w tunelu jest odseparowanie od środowiska zewnętrznego oraz wyeliminowanie możliwości kolizji z innymi pojazdami (np. samochodowymi) lub pieszymi.
3. Na potrzeby zastosowania KNC w Polsce prędkości rzędu 600 km/h powinny być wystarczające, ale projektując infrastrukturę warto uwzględnić możliwość poruszania się w przyszłości z prędkościami wyższymi o ile będzie to uzasadnione ekonomicznie. Uwaga ta dotyczy przypadku gdyby KNC miały w przyszłości obsługiwać dłuższe trasy. Wyższe prędkości nie powinny być jednak traktowane jako zagadnienie priorytetowe.
4. Elementy składowe technologii KNC są w większości dostępne i z powodzeniem wykorzystywane w przemyśle transportowym, próżniowym oraz budowlanym. Główną trudnością i wyzwaniem jest integracja elementów składowych KNC w jedną całość. Wiąże się to z pojawieniem się licznych nowych problemów, których rozwiązanie nie jest obecnie znane.
5. Trudności związane z integracją systemu KNC są bezpośrednio związane z żądanym poziomem próżni. Uzasadnionym jest założenie, iż obecnie istniejące rozwiązania mogą być wykorzystane, po drobnej modyfikacji, w próżni rzędu 1000 Pa, natomiast próżnia głęboka (~ 1 Pa) będzie wymagała znaczących modyfikacji oraz może powodować występowanie kolejnych problemów (np. gazowanie powłoki tunelu, szczelność łożysk, odprowadzanie ciepła, itd.). Możliwość uzyskania prędkości powyżej 600 km/h wydaje się nieuzasadnione ekonomicznie. Potwierdzają to także założenia najbardziej zaawansowanych zespołów, gdyż nie rozważają one wyższych prędkości.

6. Ważną zaletą rozwijania technologii KNC w Polsce wydaje się możliwość rozwoju różnych technologii składowych KNC: technologie próżniowe, tunelowe, napęd kolei dużych prędkości (tradycyjny, magnetyczny) oraz elementy z nim związane, sterowanie, itd. Zastosowanie technologii składowych KNC jest bardzo szerokie, a uzyskane tą drogą kompetencje, umiejętności i rozwiązania mogą być stosowane w wielu innych gałęziach przemysłu (kolejowy, lotniczy, samochodowy, kosmiczny, informatyczny, itd.)
 7. Warto przeanalizować, jak prace serwisowe wpływać będą na działanie sieci KNC. Wydaje się, że wszelkie nietrywialne prace serwisowe wiążąc się będą z wyłączeniem tuneli, co w przypadku sieci KNC złożonych z pojedynczych tuneli, może powodować wstrzymanie ruchu.
 8. Trzeba zwrócić szczególną uwagę na generowane ilości ciepła i sposób jego odbierania. To może być zagadnienie blokujące rozwój danej technologii na długi czas. Istotna jest weryfikacja poprawności wyliczeń mocy strat i zdolności do ich odprowadzenia, szczególnie, gdy zasilanie, napęd i falowniki znajdują się w kapsule.
 9. Odpowiednio dobrane napędy muszą zapewnić założone parametry poruszania się, w szczególności dystanse rozpędzania, które są szczególnie ważne w przypadku sieci tuneli.
 10. Przy rozważaniu konfiguracji KNC należy zwrócić uwagę na odpowiedni wybór systemu napędowego. Wymaga to dokładnej analizy. Jedną z opcji jest napęd silnikami znajdującymi się w kapsule. Rozwiązanie to ma sens jedynie przy poruszaniu się na kołach, ale będzie to generowało konieczność odprowadzenia dużych ilości ciepła oraz dostarczenie zasilania do kapsuły (w przypadku zasilania innego niż bateryjne). Innym rozwiązaniem jest zastosowanie silnika liniowego, co wiąże się z dużymi kosztami, ale rozwiązuje problemy ciepła. Warto rozważyć rozwiązanie hybrydowe, w którym kapsuła posiada napęd własny, ale na odcinkach początkowych jest napędzana przy pomocy silnika liniowego.
 11. Istotna jest weryfikacja bezpieczeństwa kapsuły, w szczególności systemu jej prowadzenia pod kątem ewentualnych wykolejeń.
 12. Wskazane jest, aby system KNC zawierał rozjazdy. Brak rozjazdów oznacza możliwość tworzenia jedynie tras punkt-punkt. Kapsuła powinna mieć możliwość pokonania rozjazdu z maksymalną prędkością, aby uniknąć konieczności odbierania a potem dostarczania energii kinetycznej od kapsuły. To może być zagadnienie blokujące rozwój danej technologii na długi czas. Tunele, będące zjazdami z rozjazdu, powinny być dostatecznie długie, aby możliwe było w nich wytracenie/uzyskanie prędkości kapsuły przed dołączeniem do tunelu głównego.
- Czas od momentu wejścia pasażera na peron do momentu, gdy kapsuła rusza, powinien być relatywnie krótki.
13. Kapsuły powinny kursować odpowiednio często, tak aby użytkownik nie musiał planować podróży z dużym wyprzedzeniem.
 14. Z uwagi na to, że KNC jest obecnie na wczesnym etapie rozwoju i tym samym nie jest dostępna na rynku, konieczne jest nowatorskie podejście do finansowania prac B+R dla KNC. Wydaje się, że odpowiedni mógłby tu być tzw. model DARPA, wykorzystywany od wielu lat przez Defence Advanced Research Projects Agency (DARPA), agencją rządową USA. Model ten wykorzystywany jest przez NCBR w formule partnerstwa innowacyjnego oraz w zamówieniach przedkomercyjnych. Opiera się on na elastyczności w działaniu i podejmowaniu decyzji, otwartości na wszystkie rodzaje badań oraz obecności wysoko wykwalifikowanych menedżerów. Procedury stosowane w ww. formule polegają na wyłonieniu w otwartym postępowaniu grupy podmiotów, które podejmą się realizacji konkretnego określonego zamówienia. Zazwyczaj projekt składa się z etapu badawczego, tj. wytworzenia prototypu produktu spełniającego zadaną specyfikację techniczną, przy uwzględnieniu dopuszczalnych uwarunkowań ekonomicznych, a następnie w przypadku partnerstwa innowacyjnego również etapu wdrożeniowego. NCBR ogłaszając postępowanie w ww. trybie, jednocześnie podpisuje umowę z potencjalnym użytkownikiem rozwijanego produktu, który zobowiązuje się do zakupu danego produktu, pod warunkiem, że ten produkt TEN powstanie i będzie spełniał określone wymagania a jego cena nie przekroczy uzgodnionej wartości. NCBR zawiera w postępowaniu umowy z więcej niż jednym wykonawcą – w toku realizacji projektów, osiągnięciu kolejnych etapów liczba finansowanych podmiotów ulega zmniejszeniu. Najlepszy podmiot, który osiągnie zakładane przy ogłoszeniu konkursu cele, otrzyma gwarantowane przez NCBR zamówienie. Proponowana procedura gwarantuje podmiotom angażującym się w prace badawczo-rozwojowe zarówno finansowanie procesu badawczego jak i rynek dla najlepszych. Stanowi to istotną różnicę w stosunku do obecnych sposobów finansowania prac badawczych, po zakończeniu których wysiłek komercjalizacji rezultatów badań spoczywa w zasadzie wyłącznie na przedsiębiorcy lub konsorcjum przemysłowo-naukowym. NCBR ma już doświadczenie w organizacji konkursów z wykorzystaniem formuły partnerstwa innowacyjnego oraz zamówień przedkomercyjnych. Obecnie (maj 2018) prowadzone są trzy takie konkursy.

