

# ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

УДК 656.027:621.644

В. Ю. СКОСАР<sup>1\*</sup>, С. В. БУРИЛОВ<sup>2</sup>, В. О. ДЗЕНЗЕРСЬКИЙ<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Відділ електротехнічних комплексів і хімічних джерел струму транспортного призначення, Інститут транспортних систем і технологій Національної академії наук України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (066) 731 86 18, ел. пошта skosarslava@gmail.com, ORCID 0000-0002-2151-3417

<sup>2</sup>Відділ електротехнічних комплексів і хімічних джерел струму транспортного призначення, Інститут транспортних систем і технологій Національної академії наук України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел.+38 (096) 140 81 70, ел. пошта S.Burylov@nas.gov.ua, ORCID 0000-0001-8070-6764

<sup>3</sup>Відділ надпровідних магнітних систем, Інститут транспортних систем і технологій Національної академії наук України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 370 22 01, ел. пошта Dzenzerskyy@nas.gov.ua, ORCID 0000-0002-5504-4524

## Деякі проблеми надшвидкісних транспортних технологій

**Мета.** Основна мета роботи полягає в тому, щоб виявити деякі технічні проблеми надшвидкісного транспорту, що обмежують ефективність відповідних транспортних технологій, для вирішення проблем у майбутньому та досягнення прогресу в зазначеній галузі. **Методика.** Застосовано теоретичний аналіз науково-технічних публікацій, системний аналіз, чисельні розрахунки, пошукове (експлораторне) прогнозування. Розглянуто особливості роботи високошвидкісного транспорту 5-го та 6-го покоління, заснованого на електродинамічному (електромагнітному) принципі руху, та здатного розвивати швидкості від 200 до 60 000 км/с. **Результати.** Автори встановили: 1) Maglev-поїзди можуть стати поширеними в розвинених країнах для пасажирських перевезень і досягти швидкостей 600–700 км/год. Вони будуть ще більш дешевими, комфортними і привабливими за рахунок нових досягнень у галузі високотемпературної надпровідності, використання пристроїв на основі наноелектроніки, вирішення питання магнітного захисту пасажирів; 2) очікується побудова кількох ліній Hyperloop для вантажних перевезень. У міру напрацювання досвіду експлуатації та вирішення питань безпеки переміщення у вакуумованому трубопроводі можливий старт пасажирських ліній. Hyperloop зможе досягти швидкості до 1 200 км/год; 3) очікується підвищення ефективності транспорту Railgun у разі розробки та застосування нових матеріалів, які б дозволили зменшити абляцію в екстремальних умовах експлуатації. Railgun і далі використовуватимуть у науково-технічній сфері і в космічній техніці; 4) можливе створення експериментальної установки Space Tram або її вдосконаленого варіанту, якщо вдасться розробити новітні матеріали, здатні протистояти абляції за високих струмів і швидкостей руху, та якщо відбудеться прорив у галузі високотемпературної надпровідності. Указана розробка обіцяє суттєво здешевити запуск на орбіту корисного вантажу; 5) Breakthrough Starshot, імовірно, не буде створено у зв'язку з рядом технічних труднощів, які поки що далекі від рішення. **Наукова новизна.** Автори вперше провели комплексний аналіз технічних проблем у галузі надшвидкісних транспортних технологій, заснованих на електродинамічному (електромагнітному) принципі руху, та запропонували прогноз розвитку зазначеного транспорту в найближчі 20–30 років. **Практична значимість.** На основі отриманих результатів можливе успішне вирішення виявлених технічних проблем, що дозволить підвищити ефективність надшвидкісних транспортних технологій, заснованих на електродинамічному (електромагнітному) принципі розгону, руху та гальмування. У найближчому майбутньому це послужить якнайшвидшому впровадженню вантажних перевезень на транспорті типу Hyperloop та вдосконаленню пристроїв розгону макротілу типу Railgun.

**Ключові слова:** надшвидкісні транспортні технології; транспорт 5 й 6-го покоління; електродинамічний принцип руху; магнітна левітація; електромагнітні хвилі; надпровідність

## Вступ

Відповідно до класифікації, запропонованої у [2], людство переживає стадію п'ятої технологічної парадигми у процесі науково-технічного розвитку, тому сучасний транспорт є «транспортом 5-го покоління». Під транспортом 5-го покоління слід розуміти інноваційний транспорт, який упроваджують та розвивають, та який характеризується високими швидкостями, екологічністю, енергозбереженням. Прикладами є: високошвидкісні залізничні магістралі, електромобілі, безпілотники, Maglev та Hyperloop. Однак у надрах п'ятої технологічної парадигми визрівають елементи наступної, шостої технологічної парадигми і, відповідно, розробляються елементи «транспорту 6-го покоління», згідно з логікою [2]. Якщо для п'ятої технологічної парадигми характерна домінуюча роль електронної промисловості, атомної енергетики, виробництва та переробки природного газу, обчислювальної та оптоволоконної техніки тощо, то в рамках шостої парадигми прогнозовано домінування наноелектроніки, наносистемної техніки, наноматеріалів та нанотехнологій [2]. Можна спрогнозувати, що Maglev та Hyperloop стануть звичайними речами, із нанотехнологічною начинкою, а на передній край вийдуть надшвидкісні транспортні технології, що поєднують принципи Hyperloop та Railgun, або технології, які використовують мікро- та нанобезпілотники й космічні зонди. Ми проаналізуємо надшвидкісні транспортні технології, які ґрунтуються на електродинамічному (електромагнітному) принципі руху. Сюди належать проекти Maglev, Hyperloop, Railgun, Space Tram та його вдосконалений варіант, Breakthrough Starshot. Виявимо деякі технічні проблеми надшвидкісного транспорту, які обмежують його ефективність, безпеку та екологічність. Наш аналіз повинен сприяти пошуку нових рішень у зазначеній галузі для досягнення прогресу транспортних технологій.

## Мета

Автори мають за мету виявлення деяких, можливо, основних технічних проблем надшвидкісного транспорту, що базується на елек-

тродинамічному (електромагнітному) принципі розгону, руху та гальмування, які обмежують його ефективність.

## Методика

Спираючись на фундаментальні основи механіки, електродинаміки, на матеріалознавство, аерогідродинаміку, фізику надпровідності, фізику плазми та фізику атмосферної електрики, врахуємо такі фактори. Існує абсолютна межа швидкості будь-якого фізичного об'єкта, а також відносні межі швидкостей руху високошвидкісного транспортного засобу. До першої належить швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі. До відносних належать швидкості поширення ударних і звукових хвиль у середовищі, де рухається транспорт, оскільки подолання зазначених швидкостей неминуче пов'язане з великими технічними труднощами та економічними витратами через різке зростання опору середовища. Також існує важливе обмеження, пов'язане з безпекою людини, зокрема, з електромагнітною безпекою в умовах транспорту, який використовує великі струми й потужні електромагнітні поля.

## Результати

*Maglev та Hyperloop.* Система Maglev сьогодні успішно працює в Японії, Китаї, Республіці Корея, причому в Японії та Кореї Maglev використовує електродинамічне підвішування, а в Китаї – електромагнітне [4]. Рекорд швидкості Maglev досягає  $\approx 600$  км/год [2]. Науково-технічні розробки сьогодні спрямовані на вдосконалення окремих елементів Maglev [14], удосконалення системи екстреного гальмування [20], системи керування рухом та/або підвісом [4], системи тягового двигуна [13], розробку нових концепцій Maglev [10]. У світі ведуть будівництво нових трас для Maglev [2]. Крім відомих технологій електродинамічного та електромагнітного підвішування, тривають дослідження експериментальної технології пасивної магнітної левітації Inductrack [19]. Щодо Hyperloop, то вже на стадії проектування у транспортної системи виникла серйозна технічна проблема. Початковий альфа-проект (2013 р.) Ілона Маска припускав, що рух поїзда відбуватиметься на повітряній подушці в умовах роз-

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

рідженого повітря у трубопроводі [11]. Однак невдовзі розробники переконалися, що такий рух нестійкий, і довелося перейти на магнітне підвішування та звичайний лінійний синхронний двигун. Вийшов Maglev у частково вакуумованому трубопроводі. Це різко збільшило вартість проєкту. Hyperloop був задуманий як розташований на опорах надземний трубопровід, усередині якого з інтервалом 30 с в одному напрямку переміщуються одиничні транспортні капсули завдовжки 25–30 м (рис. 1).

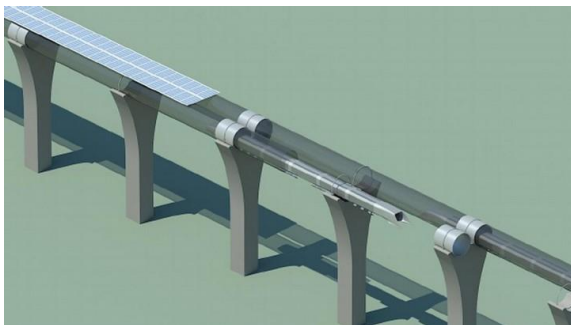


Рис. 1. Умовна ілюстрація Hyperloop [11]

Fig. 1. Conventional illustration Hyperloop [11]

Якщо створити форвакуум 100 Па (0,001 атм.) у трубопроводі, то поїзд (капсула) практично не відчуватиме аеродинамічного опору аж до швидкостей, близьких до швидкості звуку  $\approx 1\,220$  км/год. Розріджене повітря у трубопроводі планували використати для створення повітряної подушки. Для цього розташовані в носі транспортної капсули спеціальні напрямні та вентилятор повинні перенаправляти зустрічний потік повітря під днище. Це дозволило б відмовитися від набагато дорожчої реалізації ідеї магнітної подушки. Живлення електричною енергією передбачене за допомогою сонячних батарей, які можна розташувати поверх трубопроводу (рис. 1). Під час гальмування кінетична енергія капсули повинна перетворюватися знову в електричну; це призвело б до суттєвого енергозбереження [11]. Оскільки подальше моделювання показало, що рухи на повітряній подушці створюють проблеми з керуванням капсулою, то від повітряної подушки відмовилися. Перейшли до магнітної левітації, хоча вона набагато дорожча в реалізації [2]. Таким чином, Hyperloop став подібний до Maglev, тільки у вакуумному трубопроводі. А Ілон Маск, схоже, втратив початковий висо-

кий інтерес до Hyperloop. У наш час виявилася низка проблемних питань щодо транспортної системи Hyperloop. Необхідно визначитися щодо системи магнітної левітації: активна магнітна левітація на надпровідних електромагнітах, або пасивна магнітна левітація Inductrack? Існує питання надійності енергоживлення за рахунок сонячних батарей і вітроенергетичних установок. Не вирішене питання економічної доцільності тиску повітря в трубопроводі, тобто ступеня вакууму (0,001 або 0,01 атм.). Також існує проблема захисту пасажирів від низькочастотних магнітних полів, яку до кінця не вирішено навіть у Maglev, хоча формально інтенсивність магнітних полів у Maglev задовольняє стандартам безпеки. Це пов'язано з тим, що наука тільки почала виявляти справжні механізми впливу магнітних полів на організм людини. У Hyperloop також не вирішена проблема безпеки пасажирів у разі виникнення аварійних ситуацій, наприклад, за раптової розгерметизації [1, 2, 12].

Необхідно підкреслити, що опір середовища і для Maglev, і для Hyperloop стають визначальними факторами, що знижують ефективність транспорту. За відносно високих швидкостей виникають завихрення повітря за транспортним засобом, зростає аеродинамічний опір повітря руху транспорту [8]. Якщо зменшити густину повітря (тиск повітря), то ми отримуємо можливість збільшити швидкість руху транспортного засобу за інших рівних умов. Ось чому Hyperloop, на відміну від Maglev, використовує частковий вакуум у трубопроводі. Але в разі наближення швидкості транспорту до швидкості звуку в повітрі (швидкість звуку в повітрі дорівнює 1 193 км/год за температури повітря 0 °С та збільшується у випадку зростання температури повітря; за температури повітря 10; 15 та 20 °С швидкість звуку буде 1 214; 1 225 та 1 236 км/год відповідно) навіть у випадку Hyperloop різко зростає аеродинамічний опір унаслідок появи великого так званого хвильового опору, що пов'язано з генерацією ударних хвиль у повітрі [8, 20]. Наприклад, моделювання аеродинамічних і теплових навантажень на капсулу Hyperloop за різних значень швидкості капсули й тиску повітря дало такі результати. Силу аеродинамічного опору  $F_{ae}$  можна розрахувати залежно від площі перерізу  $S$  капсули,

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

перпендикулярного напрямку руху, густини повітря  $\rho$ , швидкості руху  $v$  капсули відносно повітря за формулою [2]:

$$F_{ae} = C_x \cdot S \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2}, \quad (1)$$

де  $C_x$  – безрозмірний коефіцієнт. І тоді значення  $C_x$  дорівнює 0,368–0,377 в інтервалі тиску повітря 0,001–1,000 атм. за швидкості капсули 360 км/год. А в разі наближення швидкості капсули до швидкості звуку, наприклад за 1 080 км/год, значення  $C_x$  становить 0,771–0,800 в такому ж інтервалі тиску повітря [2, 5], тобто аеродинамічний опір зростає швидше, ніж  $\sim v^2$ .

Відомі транспортні технології Maglev мають хороші перспективи для пасажирських перевезень і можуть стати поширеними в розвинених країнах у найближчі 20–30 років. Maglev стане ще більш комфортним. Пристрій на основі наноелектроніки зроблять подорож ще більш привабливою і цікавою. Перспективи широкого застосування Maglev також зростуть у разі прориву в галузі високотемпературної надпровідності, що може здешевити цей вид транспорту. При цьому буде вирішено питання магнітного захисту пасажирів, а швидкості поїздів досягнуть 600–700 км/год. Перевищення цих швидкостей недоцільне через різке зростання аеродинамічного опору та зростання енерговитрат на рух. У найближчі 20–30 років може бути побудовано кілька ліній Hyperloop для вантажних перевезень. Такі проекти вже озвучені, наприклад, у [18] (рис.2).



Рис. 2. Концепція вантажного Hyperloop [18]

Fig. 2. Concept cargo Hyperloop [18]

У цьому випадку питання безпеки перевезення не будуть настільки гострими. У міру напруження досвіду експлуатації та вирішення питань безпеки переміщення у вакуумованому

трубопроводі можливий старт пасажирських ліній. Швидкості поїздів досягнуть 1 200 км/год.

*Railgun.* Транспортну технологію Railgun (рейкотрон, електромагнітний прискорювач макротіла) засновано на відштовхуванні макротіла силою Лоренца під час протікання електричного струму крізь паралельні рейки й саме макротіло, або плазмовий поршень позаду макротіла (рис. 3). Силу  $F_z$ , яка прискорює макротіло і залежить від струму  $I_0$ , розраховують за формулою:

$$F_z = \frac{1}{2} L'_e I_0^2, \quad (2)$$

де  $L'_e$  – ефективна індуктивність на одиницю довжини рейок.

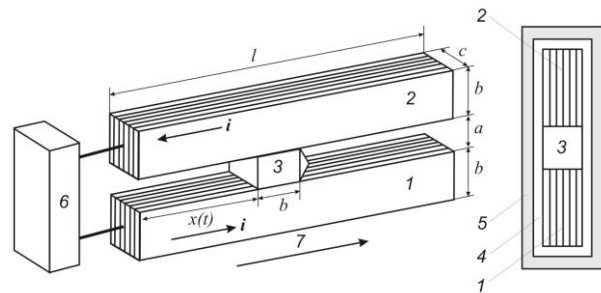


Рис. 3. Принципова конструкція Railgun (загальний вигляд і вигляд спереду)

Fig. 3. Railgun principle design (overview and front view)

Розшифруємо рис. 3: 1, 2 – нижня й верхня рейки відповідно;  $l$ ,  $b$ ,  $c$  – довжина, товщина й ширина рейок відповідно;  $a$  – відстань між рейками; 3 – макротіло;  $b$ ,  $c$  – довжина й ширина макротіла відповідно;  $x(t)$  – координата макротіла в процесі розгону;  $i$  – електричний струм крізь рейки; 4 – діелектрик; 5 – міцне кріплення; 6 – блок живлення; 7 – напрямок розгону макротіла. Формула (2) начебто не обмежує силу прискорення в рейкотроні, але практика свідчить, що існують великі енерговтрати під час роботи пристрою, що обмежує його енергоефективність і швидкість макротіла. Тому в кінетичну енергію макротіла перетворюється лише 13–35 % енергії, яку подано на Railgun, залежно від маси й максимальної швидкості макротіла. Також установлено, що не весь струм  $i$  на рейках доходить до макротіла, тобто

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

$I_0 < i$ . Railgun із рейками довжиною 0,1–10 м здатен прискорити макротіло масою від декількох грам до декількох кілограм до швидкостей  $\approx 2$ –10 км/с, причому чим більша маса тіла, тим менша його кінцева швидкість (у середньому). Енерговтрати трапляються за рахунок ерозії рейок, руйнування макротіла, тертя макротіла об рейки, розпаду плазмового поршня, опору повітря руху макротіла та ін. Для запобігання руйнування макротіла обмежують струм на рейках. Для запобігання катастрофічної ерозії рейок на фазі старту здійснюють попередній розгін макротіла за допомогою додаткових пристроїв. Для зменшення ерозії рейок на фазі прискорення й запобігання розпаду плазмового поршня застосовують потужне зовнішнє магнітне поле одного напрямку з полем рейок, а також здійснюють механічний тиск на рейки з боку зовнішнього кріплення. Опір повітря може бути усунено за рахунок вакуумування рейкотрону з установленням діафрагми на кінці рейок. Railguns використовують у науково-технічній сфері і в космічній техніці ще з ХХ століття, у ХХІ столітті посилюється інтерес до воєнного застосування Railguns [7].

Ми здійснили дослідження процесу тертя макротіла об рейки в Railgun в умовах механічного тиску на рейки з боку зовнішнього кріплення. Рейки було стиснуто зі змінною силою, пропорційною струму, поданому на рейки. Зроблено оцінка коефіцієнта тертя спокою й коефіцієнта тертя руху. На рис. 4 вказані залежності сили  $I$ , яка прискорює макротіло в рейкотроні, і залежності сил тертя макротіла об рейки: реальна сила тертя 2, а також розрахована сила тертя 3. Середній коефіцієнт тертя склав 1,6, хоча ми очікували коефіцієнт тертя ковзання в межах 0,15–0,30 [6].

Наші результати свідчать про те, що в екстремальних умовах ковзання макротіла по рейках, тобто в разі великого прискорення, високої швидкості і протікання крізь поверхню ковзання інтенсивного електричного струму, сила тертя має складний характер. Значно більша величина коефіцієнта тертя спокою може бути інтерпретована як наслідок того, що макротіло встигає частково приваритися до рейок, оскільки в зоні контакту макротіла з рейками існують електричні мікродуги. Сила тертя буде великою на початку вмикання струму, доки руйнуються

приварені частки макротіла й рейок, а коефіцієнт тертя ковзання може бути більшим за одиницю. Ми поки що не вивчили природу різкого провалу значення коефіцієнта тертя на початковому етапі руху макротіла (від 180 до  $\approx 300$  мкс). Процес тертя макротіла об рейки в електромагнітному прискорювачі макротіл виявився значно складніший, ніж ми очікували. Вказані дослідження необхідно продовжувати.

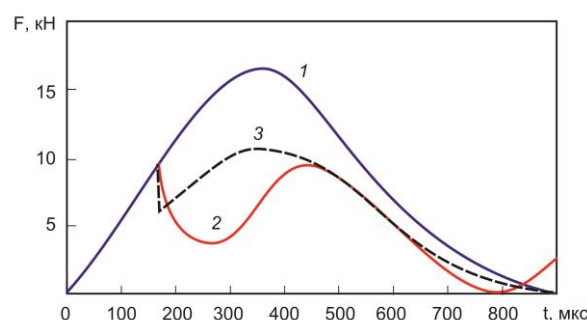


Рис. 4. Залежності сили розгону (крива 1) і сил тертя ковзання (криві 2 і 3) макротіла по рейках

Fig. 4. Dependences of the acceleration force (curve 1) and sliding friction forces (curves 2 and 3) of a macrobody on rails

Railgun і далі будуть використовувати в науково-технічній сфері і в космічній техніці для випробувань космічних матеріалів на міцність у разі зіткнення із мікрометеоритами. Підвищення ефективності Railgun можливе в разі розробки і застосування нових матеріалів для рейок і макротіл, які б дозволили зменшити абляцію в екстремальних умовах експлуатації. У такому випадку Railgun також будуть активно використовувати для воєнних застосувань. Railgun можна віднести до транспорту 6-го покоління.

*Space Tram та її вдосконалений варіант.* Транспорт Space Tram [15] та її вдосконалений варіант [17] поєднують у собі елементи технологій Hyperloop та Railgun. Транспортна система [17] включає пускову вакуумовану трубу, вантажний транспорт, джерело електроживлення. Маса вантажного транспорту має бути в межах 100 кг, але він може розвинути швидкість до 8 км/с. Пускова труба може мати довжину 50 км для прискорення транспорту в 50 г або мати довжину в один кілометр для прискорення транспорту в 3 000 г. У стінках пускової

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

труби паралельно її осі розміщені рейки, якими повинен протікати електричний струм порядку один мільйон ампер. На відміну від Railgun, вантажний транспорт не стикається з рейками і не стикається зі стінками пускової труби, а електричний струм між рейками крізь електропровідні елементи транспорту протікає за допомогою коротких (не більше ніж 5 см) металевих гнучких щіток і коротких електричних дуг. Вантажний транспорт левітує всередині пускової труби за рахунок магнітної левітації. Левітацію та бічну стабілізацію забезпечує взаємодія магнітного поля, створеного електричним струмом у рейках, з індукованими струмами на надпровідних витках, розташованих на вантажному транспорті. Усередині пускової труби створюється додаткове інтенсивне поперечне магнітне поле  $B \approx 5$  Тл, яке дозволяє істотно наростити розгін вантажного транспорту за рахунок взаємодії цього поля з електричним струмом, що протікає крізь електропровідні елементи транспорту. Магнітне поле  $B$  створюється великими струмами, що протікають надпровідними кабелями, розташованими ззовні пускової труби поблизу її стінок. Джерело електроживлення системи потребує від зовнішніх електромереж потужності порядку 1,2 МВт, і це забезпечить транспортування 10 вантажних транспортів за добу. Як вантажний транспорт можуть бути використані мікросупутники та ін. Конструкція вантажного транспорту включає зовнішній черевик  $1$  (шириною  $\approx 0,6$  м) з лінією поділу  $2$ , на якому й розташовані електропровідні елементи з короткими металевими гнучкими щітками  $3$ , а також надпровідні витки  $4$ . Після вильоту транспорту з пускової труби зовнішній черевик  $1$  легко поділяється по лінії поділу  $2$  на частини та відпадає, звільняючи апарат  $5$  з корисним вантажем (рис. 5).

Проведений нами аналіз показує, що ця перспективна транспортна технологія має серйозні недоліки. Такі самі недоліки характерні для Railgun, але там їх легше усунути чи пом'якшити їхній негативний вплив. На жаль, значна частина електричної енергії буде припадати на електричні дуги, ерозію рейок, провідних пластин транспорту і щіток. Ерозію рейок, провідних пластин і щіток буде прискорювати швидкісний скін-ефект, починаючи зі швидкостей транспорту 1–2 км/с і більше. Цей ефект

змушує електричний струм концентруватися в задній частині провідних пластин, що і призводить до підвищеної ерозії та абляції матеріалів.

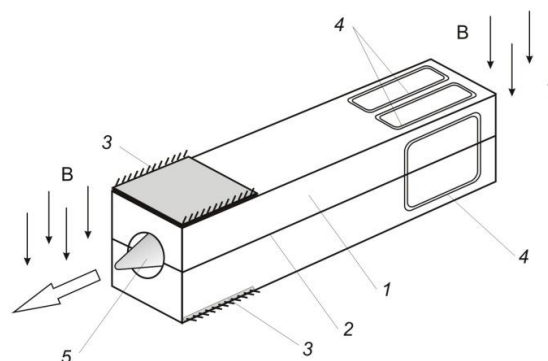


Рис. 5. Вантажний транспорт, згідно з [17]

Fig. 5. Cargo transport, according to [17]

Метал, який буде випаровуватися, сприятиме зростанню електропровідності простору позаду вантажного транспорту. А це призведе до паразитних електричних дуг між рейками пускової труби та збільшить втрати енергії і струму. Високі швидкості навіть в умовах часткового вакууму можуть спричинити утворення іонізуючої ударної хвилі попереду вантажного транспорту, що призведе до перехоплення та втрат електричного струму, зниження ефективності розгону. Для зменшення цього негативного ефекту можна замінити залишки повітря легкими газами з високим потенціалом іонізації, тобто воднем або гелієм, із подальшим вакуумуванням. Але для пускової труби довжиною 50 км такі заходи не є прості. Неясно, яким чином усунути абляцію рейок, провідних пластин. Якщо транспортна система допускає розташування пускової труби в низьких шарах атмосфери (до 20 км), як це запропоновано в [15], то необхідно забезпечити захист від атмосферної електрики, зокрема від потужних електричних розрядів – блискавок. Інакше можливе повне руйнування транспортного засобу.

Якщо вдасться розробити новітні матеріали, здатні протистояти абляції за високих струмів, то розглянута транспортна технологія може знайти використання для запуску супутників. Можливо, у найближчі 20–30 років буде побудована експериментальна установка. Для цього є певні стимули: нова технологія обіцяє суттєво

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

здешевити запуск на орбіту корисного вантажу. Перспективи застосування Space Tram та/або її вдосконаленого варіанту також зростають у разі прориву в галузі високотемпературної надпровідності, що може здешевити цей вид транспорту. Space Tram та її вдосконалений варіант є транспортом 6-го покоління.

*Breakthrough Starshot.* Це амбітна транспортна технологія, яка претендує на досягнення швидкості до 20 % від швидкості руху електромагнітних хвиль у вакуумі, тобто до  $\approx 60\,000$  км/с. На таких великих швидкостях уже «працюють» релятивістські ефекти, і маса транспортного засобу починає збільшуватися, причому в разі наближення до швидкості світла маса прагне нескінченності, як і витрати енергії на розгін. Тому швидкість електромагнітних хвиль у вакуумі є абсолютно недосяжною межею для будь-якого транспортного засобу, що має масу спокою. Але й досягнення  $60\,000$  км/с є дуже складним завданням. Згідно з офіційним сайтом [16] проєкту Breakthrough Starshot, презентацією проєкту [9], сутність транспортної технології полягає в такому. Космічна ракета доставляє у космос корабель із тисячею чи близько того мікрозондів масою один грам кожен. Опинившись на орбіті, зонди розгортають тонкі екрани-вітрила з матеріалу, який ідеально відбиває електромагнітні хвилі ( $1,06$  мкм), а потім, підштовхуваний потужними лазерними променями з Землі, один за одним рушає. Через кілька хвилин зонди будуть уже на відстані понад  $965\,500$  км від Землі і рухатимуться з 20 % від швидкості світла. Через 20 років, наблизившись до зоряної системи Альфи Центавра (віддаленої на  $\approx 4,37$  світлових років від Землі), вони виконають дослідження та надішлють інформацію назад на Землю. Для цього кожен мікрозонд буде маневрувати у такий спосіб, що його екран перетворюється на лінзу Френеля, яка фокусує електромагнітний сигнал мікрозонда у бік Землі. Фізичний принцип розгону мікрозондів засновано на ефекті тиску електромагнітних хвиль на екран площею  $4 \times 4$  м<sup>2</sup>, товщиною  $100$  нм. Гальмування мікрозондів не передбачено. Кожен мікрозонд буде пов'язано з екраном за допомогою високоміцних строп та оснащено камерою, керівним модулем, вузлом зв'язку, системою орієнтації, джерелом енергії.

Робота за цією програмою включає інші корисні результати для завдань сучасної астрономії – дослідження Сонячної системи та захист від астероїдів. Проєкт коштує  $5\text{--}10$  млрд доларів; спочатку інвестують  $100$  млн доларів у дослідження та розробки. Більша частина цих грошей піде на гігантську лазерну решітку. Ця фазована лазерна решітка повинна забезпечити потужне ( $50\text{--}100$  ГВт) і сфокусоване електромагнітне випромінювання (рис. 6) протягом 2 хв, необхідних для прискорення зондів до 20 % швидкості світла [9, 16].



Рис. 6. Схематичне зображення потужного джерела сфокусованого електромагнітного випромінювання [9]

Fig. 6. Schematic image of a powerful source of focused electromagnetic radiation [9]

Це приблизно стільки ж енергії, скільки потрібно для старту космічного корабля. Щоб отримати таку енергію, знадобиться решітка близько  $1,6$  км в поперечнику, яка об'єднує тисячі лазерів. Щоб утримувати промінь у щільному фокусі на одному зонді за раз, знадобиться адаптивна оптична система, яка компенсує атмосферну турбулентність. Конструкція екранів-вітрил повинна бути дуже тонкою, а матеріал здатним відбивати лазерне світло з коефіцієнтом відбивання не менше за  $99,999\%$  [9, 16].

На жаль, проєкт цієї амбітної транспортної системи має багато слабких моментів. Ми звернемо увагу лише на деякі з них. Якщо обмежитися лише енергетичними та екологічними аспектами цього проєкту, й не брати до уваги аспекти передачі інформації та управління, необхідно виділити ряд ключових науково-технічних проблем. Проблема номер один – це створення системи потужних випромінювачів електромагнітних хвиль інфрачервоного діапазону, здатних сфокусувати хвилі на екран площею  $4 \times 4$  м<sup>2</sup> в умовах швидкого розгону мікро-

зонда. Проблема створення матеріалу для тонкого легкого екрана (товщиною 100 нм), здатного практично ідеально відбивати електромагнітні хвилі конкретного діапазону. Проблема вивчення реакції атмосфери на потужне випромінювання, яке пронизує її наскрізь і може викликати непередбачувані фізичні ефекти, що негативно вплинуть на екологічний стан. Наприклад, можливий небезпечний ефект провокування потужних блискавок та інші негативні наслідки втручання в електричний цикл атмосфери.

Розглянемо труднощі створення матеріалу екрана. Припустимо, що на екран, який має коефіцієнт відбивання  $r = 0,99999$  і площу поверхні  $S = 16 \text{ м}^2$ , падає випромінювання потужністю  $W = 100 \text{ ГВт}$ . Припустимо також, що зворотна сторона екрана як абсолютно чорне тіло ефективно віддає тепло в космос. Тоді рівноважну температуру  $T$  екрана можна розрахувати за формулою:

$$\frac{W \cdot (1 - r)}{S} = \sigma \cdot T^4, \quad (3)$$

де  $\sigma$  – константа Стефана-Больцмана.

Простий розрахунок за формулою (3) дає рівноважну температуру екрана  $\approx 1000 \text{ К}$ . Оскільки як матеріал для екрана-вітрила плановано використання багат шарових діелектричних дзеркал, то для прикладу вкажемо таке. Розігрів до  $1000 \text{ К}$  витримують такі матеріали для діелектричних дзеркал, як флуорид магнію, діоксид кремнію, пентоксид танталу, сульфід цинку, діоксид титану. Але все одно існує більш складна проблема. Багат шарове діелектричне дзеркало може не витримати навантаження через абляцію та інші нелінійні ефекти. Оскільки в будь-якому матеріалі існують дефекти, то вже починаючи з потужностей лазерного випромінювання  $10^8\text{--}10^{11} \text{ Вт/м}^2$  виникає абляція матеріалів: плавлення, випаровування, розкладання, іонізація продуктів, формування газодинамічних струменів [3]. Потужна електромагнітна хвиля в області дефектів вириває слабко пов'язані частини матеріалу, навіть окремі атоми. Проблема з наявністю дефектів у матеріалі екрана посилюється тим фактором, що екран необхідно спочатку компактно згорнути для виведення мікрозонда на орбіту, а потім повністю розгорнути. Механічні згортання та розго-

ртання посилюють дефектність структури. На цьому етапі поки що проводять обговорення проекту. На нашу думку, у найближчі 20–30 років транспортну систему Breakthrough Starshot не буде створено навіть в експериментальному варіанті. Можливе створення окремих елементів на рівні лабораторних зразків.

### Наукова новизна та практична значимість

Автори вперше провели комплексний аналіз технічних проблем у галузі надшвидкісних транспортних технологій, які засновано на електродинамічному (електромагнітному) принципі руху. Серед основних проблем виявлено: високий опір руху з боку повітряного середовища; недостатній рівень безпеки пасажирів, у тому числі електромагнітної безпеки; абляція матеріалів у разі високих швидкостей руху та великих струмах; втрати енергії та струмів. На основі отриманих результатів можливе успішне вирішення виявлених технічних проблем, що дозволить підвищити ефективність надшвидкісних транспортних технологій. У найближчому майбутньому це послужить якнайшвидшому впровадженню вантажних перевезень на Hyperloop та вдосконаленню пристроїв розгону макротіл Railgun.

### Висновки

Теоретичний аналіз науково-технічних публікацій, системний аналіз, чисельні розрахунки, пошукове прогнозування дозволили зробити висновки щодо високошвидкісних транспортних технологій, які засновано на електродинамічному (електромагнітному) принципі руху:

– Maglev може стати поширеним в розвинених країнах у найближчі 20–30 років. Maglev стане ще більш дешевим, комфортним і привабливим за рахунок нових досягнень в галузі високотемпературної надпровідності, використання пристроїв на основі наноелектроніки, найкращого вирішення питання магнітного захисту пасажирів. Цей транспорт 5-го покоління зможе досягти швидкості 600–700 км/год;

– у найближчі 20–30 років збудують кілька ліній вантажних Hyperloop. У міру напрацювання досвіду експлуатації та вирішення питань безпеки переміщення у вакуумованому трупоб-



## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

роводі можливий старт пасажирських ліній. Цей транспорт 5-го покоління зможе досягти швидкості поїздів до 1 200 км/год;

– очікується підвищення ефективності транспортної технології Railgun у найближчі 20–30 років у разі розробки і застосування нових матеріалів, що дозволяють зменшити абляцію в екстремальних умовах експлуатації. Railgun можна віднести до транспорту 6-го покоління, який і далі використовуватимуть у науково-технічній сфері і в космічній техніці;

– у найближчі 20–30 років, якщо вдасться розробити новітні матеріали, здатні протистоя-

ти абляції за високих струмів і швидкостей руху і якщо відбудеться прорив у галузі високо-температурної надпровідності, можливе створення експериментальної установки Space Tram або її вдосконаленого варіанта. Указаний транспорт 6-го покоління обіцяє суттєво здешевити запуск на орбіту корисного вантажу;

– Breakthrough Starshot, імовірно, не буде створено в найближчі 20–30 років навіть в експериментальному варіанті; можливе створення окремих елементів на рівні лабораторних зразків. Це пов'язано з низкою технічних труднощів, які поки що не вирішено.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Баленко Н. В., Соверткова Л. С., Черниченко І. О., Бабій В. Ф., Думанський Ю. Д., Литвиченко О. М., Сердюк Є. А., Кондратенко О. Є. Дослідження генотоксичності електромагнітного поля низькочастотного діапазону. Сучасний стан. *Environment & Health*. 2018. № 1 (85). С. 14–19.  
DOI: <https://doi.org/10.32402/dovkil2018.01.014>
2. Геєць В. М., Волошин О. І., Дзензерський В. О., Никифорок О. І. *Розвиток економічних та науково-технічних основ транспорту п'ятого покоління : монографія*. НАН України, ДУ «Ін-т екон. та прогнозув. НАН України»; Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України; Інститут транспортних систем і технологій НАН України. Київ, 2020. 254 с.
3. Головин И. И., Цегельник Е. В., Планковский С. И. Проблемы математического моделирования процессов лазерной очистки в промышленности. *Журнал инженерных наук*. 2015. Т. 2, № 1. С. Е1–Е8.
4. Муха А. М., Плаксін С. В., Погоріла Л. М., Устименко Д. В., Шкіль Ю. В. Комбінована система синхронізованого керування рухом і підвісом магнітоплана. *Наука та прогрес транспорту*. 2022. № 1 (97). С. 23–31. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/265332>
5. Полевой О. Б., Редчиц Д. А. Оценка аэродинамических и тепловых нагрузок на корпус капсулы HYPERLOOP в вакуумированном путепроводе. *Системні технології*. 2019. Т. 4, № 123. С. 3–12.  
DOI: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-4-123-2019-01>
6. Скосар В. Ю., Бурилов С. В., Дзензерський В. О. Дослідження процесу тертя в електромагнітному прискорювачі макротіл. *Всеукраїнська науково-практична конференція «Стан та перспективи розвитку електричного транспорту»* (Харків, 23–25 лист. 2022 р.). Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022. С. 35–37.
7. Скосар В. Ю., Ворошилов О. С., Бурилов С. В., Дзензерський В. О. Методи зменшення енерговитрат при електромагнітному прискоренні макротіл в рейкотроні. *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті*. Матеріали XXIII міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 19–20 травня 2022). Київ : Інтерсервіс, 2022. С. 95–97.
8. Anderson J. D. *Fundamentals of aerodynamics*. Sixth edition. New York, NY : McGraw-Hill Education, 2017. 1154 p.
9. Breakthrough Starshot – Nanocraft to Alpha Centauri. (2016). *SciNews*.  
URL: <https://www.youtube.com/watch?v=RoCm6vZDDiQ>
10. Harilal J. H. Super Maglev Trains. *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)*. 2020. Vol. 10. Iss. 10. P. 614–620. DOI: <https://doi.org/10.29322/ijsrp.10.10.2020.p10678>
11. Hyperloop Alpha. *SpaceX.com*. URL: [http://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop\\_alpha-20130812.pdf](http://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha-20130812.pdf)
12. Kircher R., Palka R., Fritz E., Eiler K., Witt M., Blow L., Klühspies J. Electromagnetic Fields of High-Speed Transportation Systems: Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel-Rail. *The International Maglev Board, Research Series*. 2018. Vol. 2. P. 1–20.

13. Lv G., Zhang Z., Liu Y., Zhou T. Analysis of Forces in Linear Synchronous Motor with Propulsion, Levitation and Guidance for High-speed Maglev. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2021. Vol. 10. Iss. 3. P. 2903–2911. DOI: <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2021.3065459>
14. Nagashima K. Update on Basic Research into Superconducting Maglev and Research on Application of Maglev Technology to Conventional Railway Systems. *Quarterly Report of RTRI*. 2020. Vol. 61, No. 1. DOI: [https://doi.org/10.2219/rtriqr.61.1\\_11](https://doi.org/10.2219/rtriqr.61.1_11)
15. *Space Tram* : pat. US № 6,311,926 B1; applied on 25.04.2000; published on: 06.11.2001.
16. Starshot. *Breakthrough Initiatives*. URL: <https://breakthroughinitiatives.org/>
17. *System and method for magnetically launching projectiles or spacecraft* : pat. US US 2016/0297.548 A1; applied on 07.04.2016; published on: 13.10.2016.
18. The future is now: HHLA presents freight hyperloop concept (06-07-2021). *Railfreight.com*. URL: <https://www.railfreight.com/technology/2021/07/06/the-future-is-now-hhla-presents-freight-hyperloop-concept/>
19. Wang R., Yang B. A Transient Model of Inductrack Dynamic Systems. *ASME 2019 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (Anaheim, 18–21 August 2019). Anaheim, 2019. Vol. 8. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1115/DETC2019-97166>
20. Wang X., Hu X., Wang P., Zheng J., Li H., Deng Z., Zhang W. Numerical simulation and optimization on opening angles of aerodynamic braking plates sets for a maglev train. *Advances in Aerodynamics*. 2023. Vol. 5, No 8. P. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42774-023-00144-2>

V. YU. SKOSAR<sup>1\*</sup>, S. V. BURYLOV<sup>2</sup>, V. O. DZENZERSKYI<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Department of Electrical Complexes and Chemical Power Sources for Transport, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Pisargevskogo Street, 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (066) 731 86 18, e-mail [skosarslava@gmail.com](mailto:skosarslava@gmail.com), ORCID 0000-0002-2151-3417

<sup>2</sup>Department of Electrical Complexes and Chemical Power Sources for Transport, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Pisargevskogo St., 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (096) 140 81 70, e-mail [S.Burylov@nas.gov.ua](mailto:S.Burylov@nas.gov.ua), ORCID 0000-0001-8070-6764

<sup>3</sup>Department of Superconducting Magnetic Systems, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Pisargevskogo St., 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 370 22 01, e-mail [Dzenzerskyi@nas.gov.ua](mailto:Dzenzerskyi@nas.gov.ua), ORCID 0000-0002-5504-4524

## Some Problems of Ultra-High-Speed Transportation Technologies

**Purpose.** The main purpose of the work is to identify some technical problems of high-speed transport that limit the effectiveness of relevant transport technologies in order to solve problems in the future and achieve progress in this area. **Methodology.** The theoretical analysis of scientific and technical publications, system analysis, numerical calculations, and exploratory forecasting were used. The features of the operation of high-speed transport of the 5th and 6th generation, based on the electrodynamic (electromagnetic) principle of movement and capable of reaching speeds from 200 to 60,000 km/s, are considered. **Findings.** The authors have established: 1) Maglev trains can become widespread in developed countries for passenger transportation and reach speeds of 600–700 km/h. They will be even cheaper, more comfortable and attractive due to new advances in high-temperature superconductivity, the use of nanoelectronics-based devices, and the solution of the issue of magnetic protection of passengers; 2) several Hyperloop lines are expected to be built for freight transportation. As operational experience is gained and safety issues of traveling in a vacuum pipeline are resolved, passenger lines may be launched. The Hyperloop will be able to reach speeds of up to 1,200 km/h; 3) Railgun transportation efficiency is expected to increase if new materials are developed and applied that would reduce ablation in extreme operating conditions. The Railgun will continue to be used in the scientific and technical sphere and in space technology; 4) it is possible to create an experimental Space Tram or its improved version if it is possible to develop the latest materials that can withstand ablation at high currents and speeds, and if there is a breakthrough in the field of high-temperature superconductivity. This development promises to significantly speed up the launch of payloads into orbit; 5) Breakthrough Starshot is unlikely to be created due to a number of technical difficulties that are far from being resolved. **Originality.** For the first time, the authors conducted a comprehensive analysis of technical problems in the field of ultra-high-speed transport technologies based on the electrodynamic (electromagnetic) principle of movement and proposed a forecast for the development of this transport in the next 20–30 years. **Practical value.** Based on the results obtained, it is possible to

successfully solve the identified technical problems, which will increase the efficiency of ultra-high-speed transport technologies based on the electrodynamic (electromagnetic) principle of acceleration, movement and braking. In the near future, this will serve to speed up the introduction of freight transportation by Hyperloop-type transport and improve the acceleration devices for macrobodies such as Railgun.

*Keywords:* ultra-high-speed transport technologies; 5th and 6th generation transport; electrodynamic principle of movement; magnetic levitation; electromagnetic waves; superconductivity

## REFERENCES

1. Balenko, N. V., Sovertkova, L. S., Chernychenko, I. O., Babii, V. F., Dumanskyi, Yu. D., Litvichenko, O. M., Serdiuk, Ye. A., & Kondratenko, O. Ye. (2018). Investigations of genotoxicity of extremely low frequency electromagnetic field. current state (the first report). *Environment & Health*, 1(85), 14-19. DOI: <https://doi.org/10.32402/dovkil2018.01.014> (in Ukrainian)
2. Geets, V. M., Voloshin, O. I., Dzenzerskyi, V. O., Nikiforuk, O. I. (2020). *Rozvitok ekonomichnih ta naukovotekhnichnih osnov transportu pjatogo pokolinna*. NAN Ukrainy, DU «In-t ekon. ta prohnozuv. NAN Ukrainy»; Instytut heotekhnichnoi mekhaniky im. M. S. Poliakova NAN Ukrainy; Instytut transportnykh system i tekhnolohii NAN Ukrainy. Kyiv. (in Ukrainian)
3. Golovin, I. I., Tsegelnik, I. V., & Plankovskii, S. I. (2015). Problems of mathematical modeling of laser cleaning in industry. *Journal of engineering sciences*, 2(1), E1-E8. (in Russian)
4. Mukha, A. M., Plaksin, S. V., Pohorila, L. M., Ustymenko, D. V., & Shkil, Y. V. (2022). Combined System of Synchronized Simultaneous Control of Magnetic Plane Movement and Suspension. *Science and Transport Progress*, 1(97), 23-31. <https://doi.org/10.15802/stp2022/265332> (in Ukrainian)
5. Polovyi, O. B., & Redchys, D. O. (2019). Redchys Evaluation of aerodynamic and thermal loads on the HYPERLOOP capsule fuselage in a partly evacuated tube. *System Technologies*, 4(123), 3-12. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-4-123-2019-01> (in Ukrainian)
6. Skosar, V. Yu., Burylov, S. V., & Dzenzerskyi, V. O. (2022, November). Doslidzhennia protsesu tertia v elektromahnitnomu pryskoriuvachi makrotit. In *Vseukrainska naukovo-praktychna konferentsiia «Stan ta perspektyvy roz-vytku elektrychnoho transportu»* (pp. 35-37). Kharkiv: O. M. Beketov NUUEKh. (in Ukrainian)
7. Skosar, V. Yu., Voroshylov, O. S., Burylov, S. V., & Dzenzerskyi, V. O. (2022, May). Metody zmenshennia enerhovytrat pry elektromahnitnomu pryskorenni makrotit v reikotroni. In *Vidnovliuvana enerhetyka ta ener-hoefektyvnist u XXI stolitti. Materialy XXIII mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii* (pp. 95-97). Kyiv: Interservis. (in Ukrainian)
8. Anderson, J. D. (2017). *Fundamentals of aerodynamics*. Sixth edition. New York, NY: McGraw-Hill Education (in English)
9. Breakthrough Starshot – Nanocraft to Alpha Centauri. (2016). *SciNews*. Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=RoCm6vZDDiQ> (in English)
10. Harilal, J. H. (2020). Super Maglev Trains. *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)*, 10(10), 614-620. DOI: <https://doi.org/10.29322/ijsrp.10.10.2020.p10678> (in English)
11. Hyperloop Alpha. *SpaceX.com*. Retrieved from [http://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop\\_alpha-20130812.pdf](http://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha-20130812.pdf) (in English)
12. Kircher, R., Palka, R., Fritz, E., Eiler, K., Witt, M., Blow, L., & Klühspies, J. (2018). Electromagnetic Fields of High-Speed Transportation Systems: Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel-Rail. *The International Maglev Board, Research Series*, 2, 1-20. (in English)
13. Lv, G., Zhang, Z., Liu, Y., & Zhou, T. (2022). Analysis of Forces in Linear Synchronous Motor With Propulsion, Levitation and Guidance for High-Speed Maglev. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 10(3), 2903-2911. <https://doi.org/10.1109/jestpe.2021.3065459> (in English)
14. Nagashima, K. (2020). Update on Basic Research into Superconducting Maglev and Research on Application of Maglev Technology to Conventional Railway Systems. *Quarterly Report of RTRI*, 61(1), 11-15. DOI: [https://doi.org/10.2219/rtriqr.61.1\\_11](https://doi.org/10.2219/rtriqr.61.1_11) (in English)
15. Powell, J. R., & Maise, G. (2001). *US № 6,311,926 B1*. (in English)
16. Starshot. *Breakthrough Initiatives*. Retrieved from <https://breakthroughinitiatives.org/> (in English)
17. Powell, J. R. (2017). *Patent US 2016/0297.548 A1*. (in English)

18. The future is now: HHLA presents freight hyperloop concept (06-07-2021). *Railfreight.com*. Retrieved from <https://www.railfreight.com/technology/2021/07/06/the-future-is-now-hhla-presents-freight-hyperloop-concept/> (in English)
19. Wang, R., & Yang, B. (2019, August). A Transient Model of Inductrack Dynamic Systems. *ASME 2019 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (Vol. 8, pp. 1-10). Anaheim. DOI: <https://doi.org/10.1115/DETC2019-97166> (in English)
20. Wang, X., Hu, X., Wang, P., Zheng, J., Li H., Deng, Z., & Zhang, W. (2023). Numerical simulation and optimization on opening angles of aerodynamic braking plates sets for a maglev train. *Advances in Aerodynamics*, 5(8), 1-18. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42774-023-00144-2> (in English)

Надійшла до редколегії: 28.02.2023

Прийнята до друку: 27.06.2023