

Вакуумно-левитационный транспорт: перспектива или тупик?



А. Н. Фионов,
к.т.н., зав. кафедрой
«Производственный
менеджмент
высокоскоростного
железнодорожного
движения» Московского
государственного
университета путей
сообщения Императора
Николая II (МИИТ)

Несколько лет назад с подачи СМИ стала активно «раскручиваться» идея перемещения людей и грузов в вакууме. Публикации, футуристические рисунки, видео в Интернете должны были создать впечатление о широких перспективах, открывающихся с началом использования вакуумного транспорта, который позволяет двигаться со скоростью 1000 и более км/ч. Попробуем рассмотреть проблему создания такого транспорта с разных позиций.

Как известно, новое – это хорошо забытое старое. Идея вакуумного транспорта была публично высказана более ста лет назад. Возможность одновременного использования вакуума и магнитного подвеса рассматривалась отечественным геофизиком, профессором Томского политехнического института Борисом Петровичем Вейнбергом в 1914 г. (рис. 1).

Позже было сделано множество попыток реализовать эту идею, однако до ее практического применения дело не дошло.

Несколько лет назад к этой теме обратился Илон Маск, его предложение разработать проект вакуумной транспортной системы Hyperloop (Суперпетля) было воспринято как нечто новое и революционное. Казалось, что на современном уровне развития материалов, техники и технологий можно реализовать идею создания вакуумного поезда. Этому способствовало появление новых высоковольтных и сильноточных силовых полупроводников (IGBT-транзисторов), новых магнитных материалов (Nd-Fe-B), металлокерамических высокотемпературных сверхпроводников (Y-Ba-Cu-O). В отсутствие силы аэродинамического сопротивления внутри вакуумированной трубы и механического контакта системы со стенками при использовании, например, магнитного подвеса (как принято сейчас называть, вакуумно-левитационный транспорт – ВЛТ) появляется возможность увеличить скорость движения до нескольких тысяч километров в час. Вместе с тем возникает огромное количество технических и организационных проблем [1–3].

Целесообразно рассмотреть вопрос создания нового вида транспорта со следующих позиций: экономической, технической и социальной. Очень важ-

но также учитывать имеющийся опыт разработки проектов высокоскоростных железнодорожных магистралей (ВСМ).

Первый вопрос – кто инициатор и/или заказчик, кто заинтересован в этом проекте. Идея новой транспортной системы возникает вследствие необходимости (например, из-за отсутствия пропускной способности на маршруте) или сильной политической воли. На этом этапе любой может быть инициатором и драйвером проекта. И необходимо определить, кто будет заказчиком предпроектного анализа, в рамках которого будут исследованы грузо/пассажиропоток, социально-экономическая ситуация, определен в первом приближении коридор и всеобъемлющий план для будущей транспортной сети.

Проект должен исходить из экономической целесообразности с учетом необходимых объемов перевозок и времени доставки. Если речь идет о грузах, то какой объем (контейнерных) перевозок необходим? Если предполагается перевозка пассажиров, какой пассажиропоток определяет минимальную доходность проекта? На какое расстояние целесообразно перемещать груз и/или пассажиров?

При проектировании новой трассы должен быть выбран транспортный коридор. Экономика такого проекта диктует необходимость максимально охватывать крупные населенные пункты и промышленные центры, а также учитывать перспективу развития новых жилых и промышленных районов. Проекты ВСМ не входят в число коммерчески окупаемых: они развиваются благодаря государственной поддержке и за счет социально-экономических эффектов (развития регионов, промышленности, появления новых рабочих мест, в том числе для строительства ВСМ, повыше-

Нить воздуха – нить сопротивления среды, нить касания ко дну или потолку трубы – нить внешнего трения, нейтрализована сила тяжести, – и раз получившееся движение тьло мчится дальше с этой скоростью, не мбывая ей. И нить теоретически предельная скорость – если исключить из рассмотрения электромагнитную инерцию, которая помогает предельно достижимым скоростям движения вещественных тьлов, равной скорости света, а в нашем случае вызывает индукционные токи Фуко, задерживающее влияние которых может быть сделано практически сколь угодно малым соответственным разделением металлических масс, – нить предельно достижимых скоростей, и не надо никакой энергии, чтобы поддерживать скорость постоянной.

Рис. 1. Из книги проф. Б. П. Вейнберга «Движение без трения» (1914 г.)

ния мобильности населения, развития туризма и др.). Например, положительный денежный поток проекта ВСМ Москва – Казань (770 км) можно ожидать по достижении пассажиропотока более 10 млн пассажиров в год. Согласно прогнозам, это произойдет не раньше, чем через 15–20 лет.

Если предположить, что в капсуле ВЛТ 28 мест и интервал движения составляет две минуты (время экстренного торможения при постоянном замедлении 3 м/с^2 со скорости 1000 км/ч составляет 1,54 мин, что крайне сложно обеспечить по условиям безопасности), то возможный объем перевозок при 12-часовой работе в сутки составит около 10 000 пассажиров. В проекте ВСМ запланированные размеры движения на участке Москва – Казань к 2030 г. составят 15 пар поездов, т. е. максимальный объем перевозок при вместимости поезда 600 мест около 9000 пассажиров, а к 2050 г. – 24 пары, т. е. более 14 000 пассажиров. При этом сохраняется существенный резерв увеличения производительности ВСМ, в то время как для ВЛТ такое увеличение проблематично.

Эффективность проекта ВСМ может быть повышена за счет организации смешанного пассажирско-грузового сообщения, например, перевозки грузов определенной номенклатуры в ночное время, когда нет пассажирского движения, а также за счет развития интернет-торговли. Из анализа грузопотоков следует, что средний интернет-заказ составляет по массе около 7 кг и занимает небольшой объем, так как основную долю таких заказов составляют электротехнические, электронные, парфюмерные и прочие товары. Сроки доставки заказанного товара от места его производства до потребителя определяют коммерческий успех. Поэтому в проекте ВСМ Москва – Казань предполагается применить специальный подвижной состав для перевозки подобных грузов авиационными контейнерами.

Какой должен быть источник финансирования нового проекта? Возможно ли привлечение средств государственного бюджета? Можно ли привлечь к проекту частные инвестиции?

Опыт реализации проектов ВСМ во многих странах показывает, что наиболее эффективным механизмом финансирования таких сложных инфраструктурных проектов может быть государственно-частное партнерство (ГЧП). Существует множество различных форм

ГЧП, на основе которых реализуются проекты строительства и эксплуатации автомобильных дорог, ВСМ. В России постепенно получают развитие концессионные схемы, например строительство Западного скоростного диаметра кольцевой дороги в Санкт-Петербурге. Любой частный инвестор (для крупных инфраструктурных проектов это, как правило, пул проектных, строительных, эксплуатационных и финансовых организаций) не сможет принять решения об участии в проекте без тщательного анализа организационно-правовой схемы, результатов финансового и экономического моделирования, анализа рисков, включая возможность технической реализации проекта.

Для реализации ВЛТ потребуется решить комплекс технических проблем. Важнейший вопрос, возникающий на начальном этапе, – какой должна быть оптимальная скорость новой транспортной системы – 1000, 6500 или более км/ч. Выбор скорости определяется техническими характеристиками и требованиями к обеспечению безопасности, а в дальнейшем необходима корректировка производительности транспортной системы и, соответственно, экономических и социальных показателей проекта. Например, трассировку линии (радиусы кривых) необходимо определять с учетом непогашенного ускорения (для пассажиров). Эта величина по действующим нормам при скорости 400 км/ч не должна превышать $0,4 \text{ м/с}^2$. Значит, минимальный радиус кривой в плане составляет около 10 км. Если рассмотреть профиль трассы при уклоне 24 ‰ и скорости 400 км/ч, то радиус кривых должен быть от 30 до 42 км (см. также <http://www.computerra.ru/78586/hyperloop-as-open-source/>). А какой должен быть план и профиль трассы новой транспортной системы при скорости, например, 1000 км/ч? Идеально ровной? Пассажиры не должны испытывать перегрузок. Или такой пример: разгон до 400 км/ч при постоянном ускорении 1 м/с^2 (эта величина ограничивается действующими нормами для перевозки пассажиров железнодорожным транспортом) происходит на длине более 6 км, а разгон до скорости 1000 км/ч – на длине более 38 км. Сравните: длина трассы Хунчунь – Зарубино 65 км! Грузы можно перевозить и с большим ускорением. Например, тормозной путь поезда ВСМ со скорости 400 км/ч до 0 при экстрен-

ном торможении превышает 8 км, а при торможении от скорости 1000 км/ч и экстренном торможении (при перевозке пассажиров с замедлением до 3 м/с^2) он значительно больше. Тормозным путем должен определяться интервал движения между капсулами. Это не позволяет «загнать в трубу» большое количество капсул, что, соответственно, влияет на провозную способность транспортной системы.

Следующий важнейший вопрос – обеспечение комплексной системы безопасности. Должен ли быть обеспечен непрерывный контроль местоположения подвижных капсул? Должна ли быть обеспечена непрерывная тяга вдоль всей трассы? Допустимо ли по условиям безопасности использовать импульсный режим разгона и/или торможения? Следует ли размещать вдоль трассы аварийные вакуум/атмосферные шлюзы и на каком расстоянии? Какой должен быть интервал движения по условиям безопасности, если исходить из ограничений по длине тормозного пути? Как эти ограничения скажутся на производительности транспортной системы?

При движении капсулы внутри трубы с вакуумом возникает проблема отвода тепла от трения движущейся капсулы в остаточной атмосфере, а также тепла, выделяемого системой магнитного подвеса и линейного электропривода [4].

Другая проблема, которую предстоит решать, – это динамические взаимодействия «труба (или путевая структура) – капсула». Как предполагается, труба будет иметь опоры, между которыми всегда будет существовать механический прогиб. На трубу действуют атмосферное давление (неизбежна механическая деформация), внутреннее тепловыделение, изменения температуры внешней среды. При высокоскоростном прохождении капсулы неизбежно возникновение механических колебаний, воздействующих на путь и капсулу, а также распространение волновых процессов вдоль трассы. Это потребует специальных исследований и экспериментов для выбора материала и определения механических характеристик путевой структуры (трубы) и подвижного модуля (капсулы), рационального расстояния между опорами.

И это лишь незначительное количество проблем, которые предстоит решать при создании ВЛТ. Некоторый предварительный анализ и доклады,



Рис. 2. Электромагнитная транспортная система TRANSRAPID (Германия).



Рис. 3. Подвижной состав L-zero для электродинамической системы.

сделанные на объединенном Ученом совете ОАО «РЖД», подтверждают, что на современном уровне развития техники, материалов и технологий реализация вакуумного поезда крайне проблематична. Критический взгляд на проблему представлен на сайте <http://www.warandpeace.ru/ru/analysis/view/118002>.

Абстрагируясь от проблем создания и поддержания вакуума, отвода тепла при перемещении в безвоздушном или глубоко разреженном пространстве, остановимся на проблемах бесконтактного перемещения и обеспечения разгона и торможения подвижных модулей внутри форвакуумного пространства. Известно, что разработчик ВЛТ Hyperloop Transportation Technologies отказался от воздушной подушки (в разреженной атмосфере!) для подвеса подвижного модуля и сконцентрировался на системах магнитного подвеса (МП) и линейного тягового электропривода (ЛТЭП). Как мы полагаем, сегодня им нет альтернативы применительно к ВЛТ.

Далее будут представлены основные системы МП и ЛТЭП, которые можно, на наш взгляд, рассматривать в качестве базовых для ВЛТ [5, 6]. При использовании магнитного подвеса необходимо определить путевую структуру и систему подвеса: электромагнитную (рис. 2; детальнее см. www.mvr.de), электродинамическую (рис. 3; детальнее см. www.rtri.or.jp или с постоянными магнитами.

Известно, что МП сопровождается потерями в путевой структуре и приводит к ее нагреву, что для ВЛТ, как было указано раньше, служит ограничительным температурным фактором. Одним из возможных вариантов может стать применение высокотемпературных сверхпроводников для системы подвеса, что потребует использования криогенной техники на борту подвижного модуля [7, 8]. Это обстоятельство ни в

каком случае не должно ставить крест на таком виде магнитного подвеса. Более того, на наш взгляд, это наиболее перспективное направление в развитии новой транспортной технологии.

Каким должен быть линейный двигатель для ВЛТ? Длинномоторным с размещением непрерывно вдоль трубы статора с трехфазной обмоткой и индуктором (магнитами на борту) или короткостаторным с размещением индуктора с трехфазной обмоткой на борту и вторичным элементом в виде электропроводящей (алюминиевой) полосы внутри трубы? Как управлять режимом тяги/торможения? В любом случае потребуется управление по частоте и напряжению тяговым двигателем, а также структурированная вдоль трассы система электроснабжения. Не останавливаясь на преимуществах и недостатках того или иного вида линейного привода, можно сказать, что в том и в другом случае возникнет значительное тепловыделение в вакуум, которое потребует отвести в окружающую среду. И это помимо тепла, выделяемого на поверхности капсулы при ее движении в сильно разреженной атмосфере.

Каким образом объединить систему подвеса и линейный двигатель? Для каждой из систем подвеса (или комбинации) должен быть предложен тягово-подъемный модуль бортового (капсульного) размещения, объединяющий систему подвеса и тяги, а также поперечную стабилизацию. Фактически необходимо решить техническую задачу управляемого полета на минимальной (несколько миллиметров!) высоте. И вместе с тем — обеспечить необходимые динамические характеристики, о которых упоминалось раньше.

Одновременно должен быть выполнен анализ, в частности экономический (капитальных затрат и эксплуатационных расходов, а также оценка стоимо-

сти жизненного цикла), преимуществ и недостатков каждого варианта при обеспечении условий безопасной транспортировки. (Испытания, которые были проведены в Неваде, нельзя признать соответствующими объявленному проекту (рис. 4).) В ролике, размещенном в интернете и продублированном многократно на разных сайтах, показаны испытания системы линейного тягового электропривода без магнитного подвеса. Тележка разгоняется на колесах и тормозится с помощью водяного тормоза на трассе длиной около 400 м с ускорением 2,4g. В этой области существуют значительно более продвинутые технологии и действующие коммерческие транспортные системы (TRANSRAPID, L-ZERO или MLX, LINIMO и другие).

Почти 40 лет назад в Советском Союзе в процессе работы над новыми транспортными системами был выявлен ряд проблем, решение которых потребовало глубокой технической проработки, поиска конструктивных решений, проведения комплекса экспериментальных исследований и линейных испытаний.

Сегодня целесообразно сосредоточить усилия науки на поиске новых магнитных материалов с высокой запасенной магнитной энергией, новых высокотемпературных сверхпроводников,

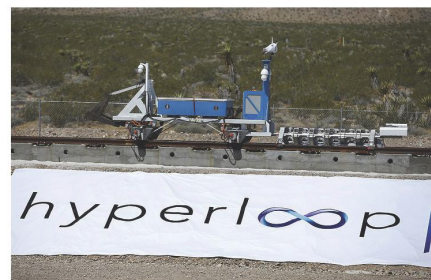


Рис. 4. Подвижный элемент системы линейного тягового электропривода без магнитного подвеса в Неваде

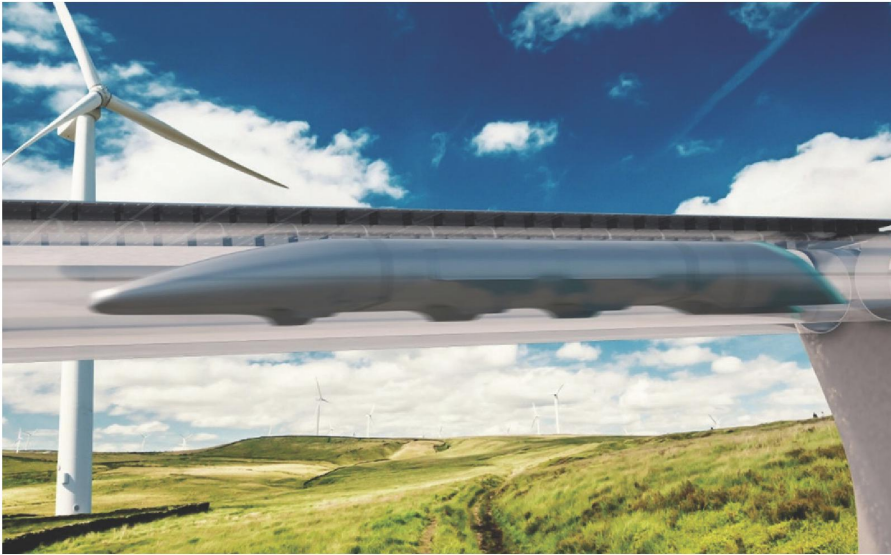


Рис. 5. Проект Hyperloop (3D-модель)

обеспечивающих стабильные сверхпроводящие свойства при динамических силовых изменениях магнитных полей и токов в широком температурном диапазоне, и рассматривать их применение в транспортных системах с МП и ЛТЭП для внутригородского, пригородного и междугородного сообщения. Линейный тяговый привод в метро позволит уменьшить диаметр туннеля, снизить капитальные затраты на его строительство. Новые технологии нужно экспериментально отработать в атмосферной среде, а затем их можно развить для вакуумного транспорта (если потребность в нем будет доказана экономически). Вполне вероятно, что преимущества МП и ЛТЭП станут очевидными прежде всего в городском и пригородном сообщении, а также в смежных отраслях промышленности.

Необходимо напомнить, что в конце 1980-х – начале 1990-х годов Мосгорисполком рассматривал проект транспортной системы Шереметьево – Москва (Центр международной торговли на Краснопресненской набережной) и признал его успешным. Был разработан технический проект, изготовлены элементы подвижного состава, систем управления, путевой структуры (рис. 6). Но наступила перестройка, и этот проект, к сожалению, не удалось реализовать. Возможно, пора его возродить на новой технологической базе для Новой Москвы.

Резюмируя сказанное, нужно подчеркнуть, что предстоит решить следующие задачи:

- определение оптимальных сфер и экономической целесообразности применения МП и ЛТЭП на транспорте;
- разработка современных материалов (конструкционных, магнитных), на

основе нанотехнологий с целью уменьшения весогабаритных показателей и стоимости без снижения основных качественных свойств этих материалов;

- исследование и разработка систем МП и ЛТЭП на основе высококоэрцитивных постоянных магнитов, высокотемпературной сверхпроводимости и соответствующих сверхпроводящих материалов;

- создание и испытания тягово-подъемных модулей, макетов и прототипов подвижного состава и пути для использования в системах МП и ЛТЭП, обеспечивающих рабочие зазоры от 20 и больше мм;

- теоретические и экспериментальные исследования динамики движения прототипов подвижного состава и взаимодействия путь – подвижной состав;

- исследование и разработка малогабаритных электросиловых систем управления МП и ЛТЭП, накопителей энергии, а также бесконтактной системы передачи электроэнергии при высокой скорости движения;

- исследование и разработка систем управления движением, а также передачи параметров движения в условиях различных типов возмущений;

- исследование проблем создания высокоскоростных грузовых контейнерных систем с применением МП и ЛТЭП;

- создание промежуточных вариантов систем транспорта с применением ЛТЭП и стального колеса. ■

Литература

1. Yaoping ZHANG, Daryl OSTER, Masayuki KUMADA et al. Key vacuum technology



Рис. 6. Вагон ТПО5 – первый в СССР вагон на электромагнитной подвеске с линейным электроприводом (1986 г.)

issues to be solved in evacuated tube transportation // J. Modern Transp. Vol. 19. № 2. June 2011. P. 110–113. Journal homepage: jmt.swjtu.edu.cn

2. Daryl OSTER, Masayuki KUMADA, Yaoping ZHANG. Evacuated tube transport technologies (ET3)tm: a maximum value global transportation network for passengers and cargo // J. Modern Transp. Vol. 19. № 1. March 2011. P. 42–50. Journal homepage: jmt.swjtu.edu.cn.

3. «Мы хотим решить транспортные проблемы человечества». Глава Hyperloop Transportation Technologies Дирк Алборн – о работе над идеей Илона Маска. «Коммерсантъ» от 07.12.2016, <http://www.kommersant.ru/doc/3163558>

4. Фомин В. М., Наливайченко Д. Г., Терентьев Ю. А. К вопросу выбора диапазона рабочих параметров вакуумного магнитолевитационного транспорта // XI Межд. науч.-техн. конф. «Вакуумная техника, материалы и технология». М.: КВЦ «Сокольники», 2016. 12–14 апреля.

5. Транспортные системы с магнитным подвешиванием и линейным электроприводом/ Винокуров В.А., Галенко А.А., Горелов А.Т. и др. // Машиностроение: энциклопедия. В 40 т. 2008.

6. Винокуров В. А., Галенко А. А., Горелов А. Т. и др. Транспорт на новых технологических принципах. В 2 т. М.: МИИТ, 2004.

7. Stephan R. M., de Andrade R. Jr., Ferreira A. C. et al. The First Full Scale Functional Prototype of the Superconducting Magnetically Levitated Vehicle MagLev-Cobra// ? The 21st Int. Conf. on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives. Daejeon, Korea, 2011.

8. Hyung-Suk Han, Dong-Sung Kim. Magnetic Levitation Maglev Technology and Applications// Springer Science+Business Media Dordrecht 2016. 247с.