



Перспективы вакуумного магнитолевитационного транспорта



Борис ДРОЗДОВ
Boris V. DROZDOV

Юрий ТЕРЕНТЬЕВ
Yuri A. TERENCEV



Дроздов Борис Викторович — доктор технических наук, генеральный директор НИИ информационно-аналитических технологий (НИИ ИАТ), Москва, Россия.

Терентьев Юрий Алексеевич — независимый эксперт, официальный представитель «ЕТЗ» в Российской Федерации, Москва, Россия.

Prospects for Vacuum Magnetic-Levitation Transport

(текст статьи на англ. яз. —
English text of the article — p. 96)

Авторы предлагают принципиально новый подход к решению проблемы преодоления двух технологических пределов роста скорости, существующих для рельсовых транспортных средств. Оцениваются преимущества вакуумного магнитолевитационного транспорта по сравнению с традиционными транспортными системами. Определяются перспективы применения этого вида транспорта применительно к стратегии развития транспортной системы России.

Ключевые слова: вакуумный магнитолевитационный транспорт, удельные энергозатраты, транзитный транспортный ресурс, магнитный подвес, вакуумный трубопровод.

Чтобы стать цивилизационным центром на евроазиатском континенте, России необходимо активизировать свое участие в реализации геостратегических проектов, ключевую роль в которых будут играть транспортные системы.

Для современных традиционных транспортных технологий уже сейчас очевидно, что основными лимитирующими их факторами и тормозом прогресса стали недостаточные предельные скорости транспортных средств (ТСР), низкие транспортная эффективность, пропускная и провозная способности магистралей. В частности, на железных дорогах России для изначально используемой технологии движения «колесо—рельс» наметились проблемы при последовательном достижении транспортом двух технологических пределов роста скорости ТСР.

Первый предел связан с ограничением динамики разгона и торможения ТСР, зависящим от сцепления колеса с рельсом и надёжности токосъёма на постоянном и переменном токах. Второй предел связан с ограничением возможности дальнейшего повышения скорости ТСР примерно до

500 км/ч, обусловленным ростом в третьей степени затрат энергии на преодоление растущего аэродинамического сопротивления его движению.

В первом случае логичным видится переход на бесконтактные (маглев) или магнитолевитационные транспортные (МЛТ) принципы организации движения ТСП, активно развиваемые в том числе и в нашей стране [1–4]. Достоинства, недостатки и неоспоримые преимущества магнитолевитационных высокоскоростных (около 500 км/ч) технологий, реализуемых в естественных «атмосферных» условиях окружающей среды, по сравнению с традиционной высокоскоростной рельсовой (ВСП) технологией достаточно подробно рассмотрены и обоснованы в работах отечественных и зарубежных исследователей [1–5].

Магнитолевитационный (МЛТ) «атмосферный» транспорт является перспективным первым этапом развития высоко- и сверхвысокоскоростного наземного транспорта. В стратегической перспективе, реализация этого проекта и его передовой отечественной разработки «МагТранСиТи» [1–3] в комбинации с вакуумной магнитолевитационной технологией (ВМЛТ) [6, 7] позволит добиться, к примеру, сверхскоростного транспортного соединения акваторий Тихого и Атлантического океанов через Евразийский континент по территории России и откроет новые возможности к созданию межконтинентальных транспортных магистралей, появлению целого ряда новых технологических решений в области энергетики, сверхпроводимости, криогеники, способных существенно изменить экологическую ситуацию в мире. При этом Россия может реализовать мощную экспортную составляющую в виде транзитного грузового потока, в частности, в направлениях Север–Юг, Восток–Запад между странами Азиатско-Тихоокеанского региона и Европой.

Но даже в технологии «атмосферного» МЛТ по мере роста скорости движения квадратично возрастает аэродинамическое сопротивление движению ТСП и при достигнутых им уже сейчас рекордных скоростях более 1000 км/ч, основная часть мощности привода ТС вынужденно затрачивается на преодоление такого

сопротивления, определяя пределы применимости и этой прогрессивной технологии.

Нами предлагается принципиально новый подход к решению проблемы преодоления одновременно и первого, и второго пределов увеличения скорости ТСП на основе очевидных преимуществ «вакуумно-трубопроводной» транспортной технологии» (ВТЗ) [6–9].

Концепция ВМЛТ по этой технологии является примером эффективной конвергенции магнитолевитационной, сверхпроводниковой и вакуумной технологий для наземного транспорта, позволяющей ему в потенциале достигать скорости движения порядка 6500 км/ч и более, причем при весьма высокой пропускной способности магистрального путепровода, приемлемой стоимости перемещения пассажиров и грузов, а также рекордно низких затратах энергии. Так, по данным [8, 10] перевозка 1800 пассажиров на расстояние 1 км требует затрат энергии в пределах 1 кВт·ч и 0,004 кВт·ч/т·км на доставку грузов.

Основные принципы симбиоза двух идей — концепции транспорта на магнитном подвесе и в искусственно созданной разреженной вакуумной среде внутри герметичного трубопровода — были впервые сформулированы, разработаны и опубликованы отечественным учёным-геофизиком Б. П. Вейнбергом [11] и позднее развиты и описаны в [6–10].

В этой статье на базе изложенного принципа рассматривается крупномасштабный инфраструктурный проект создания в стратегической перспективе новой интегральной транспортной системы (ТС), позволяющей, в частности, решить проблему транспортной доступности в странах Евразийского союза на основе объединения имеющихся сейчас традиционных видов транспорта и новых безаэродомных амфибийных, экранопланных, аэростатных и других инновационных средств транспорта.

Сравним различные транспортные системы по такому важнейшему количественному показателю, как удельные энергозатраты на перевозку единицы груза на единицу расстояния (в килоджоулях на т·км) в терминах так назы-





Таблица 1

Энергетические показатели различных транспортных систем

№	Транспортная система	Вид транспорта	Мощность, МВт	Скорость, м/с	Вес полезного груза, Т	Ур • э кДж /т • км
1	Боинг-747	авиа	71	253	64	4 380
2	Экраноплан «Лунь»	авиа	137	138	120	8 333
3	Грузовой состав	ж.д.	4,4	20,0	2000	110
4	ВСМ- магистраль TGV	ж.д.	8,8	83,3	50	2 173
5	Автотрейлер	авто	0,338	22,2	20	761
6	СТЮ	струнный	0,040	3,3	4	120
7	Автопаром	мор.	17,6	10,8	3345	487
8	СПК «Вихрь»	мор.	3,5	19,4	26	7 009
9	ВМЛТ	ВМЛТ	0,5 (имп., 16 с)	180	0,4	14,05

Обозначения: ВСМ – высокоскоростная магистраль; TGV – тип западноевропейской ВСМ; СТЮ – струнный транспорт Юницкого; СПК – судно на подводных крыльях.

ваемой «физической экономики». Основным энергетическим критерием перевозки здесь выступает критерий удельных энергозатрат на перевозку единицы веса груза на единицу расстояния [12]. Этот критерий, обозначаемый Урэ (удельный расход энергии), имеет размерность кДж/т • км. Величина Урэ определяется формулой:

$$Урэ = N/M \times V,$$

где N – полезная мощность тяговой машины (тягового двигателя) транспортной системы, в киловаттах (1 кВт = кДж/с);

M – масса перевозимого груза, в тоннах;

V – скорость, с которой перевозится груз транспортной системой, км/с.

С помощью показателя удельных энергозатрат Урэ можно решать задачу определения перспективных направлений развития различных видов транспорта, в том числе и ВМЛТС. В таблице 1 на основе данных [13] приведены результаты сравнения по показателю Урэ традиционных и перспективных видов транспорта, включая наземный, морской (водный) и воздушный, а ниже – оценка для ВМЛТ.

Как видно из таблицы 1, без учёта ВМЛТ, наилучшие параметры энергетической эффективности (но не всегда с сопоставимой скоростью перевозок) имеет по выбранному критерию железнодорожный транспорт классического типа, одна-

Таблица 2

Совокупные показатели удельных энергозатрат и времени доставки для различных СТ и способов перевозки грузов

N п/п	Тип транзита	Ур э, (кДж/ т • км)	L, (км)	P, (кДж/т)	Время доставки груза (сутки)
1	Железнодорожный (российский транзит) (Китай–Финляндия)	110	10 000	$1.1 \cdot 10^6$	12 (7)
2	Морской (Китай–Финляндия)	54,3	21 000	$1.14 \cdot 10^6$	28
3	Железнодорожный (российский транзит) (Корея–Зап. Европа)	110	11 000	$1.2 \cdot 10^6$	14
4	Морской (Корея–Зап. Европа)	54,3	22 000	$1.2 \cdot 10^6$	30
5	Железнодорожный (российский транзит) (Китай–Зап. Европа)	110	11 000	$1.21 \cdot 10^6$	15
6	Морской (Китай–Зап. Европа) (Шанхай–Амстердам)	54,3	23 000	$1.25 \cdot 10^6$	27–46
7.	Российский транзит (Китай–Зап. Европа) ТС ВМЛТ	14,05	11 000	$1,54 \cdot 10^5$	0,1

Сравнительные характеристики различных видов транспорта

№ п/п	Вид транспорта	Средняя скорость, км/ч	Средняя скорость, м/с	Удельные энергозатраты, Дж/м кг (МДж/т • км)*	Транспортная эффективность**
1	Железная дорога	60	17	0,15	100
2	Морской транспорт	40	11	0,08	125
3	Автомобиль	100	28	2,0	15
4	Самолёт	700	194	2,2	90
5	Инерциальный трубопроводный транспорт	500	139	0,009	16000
6	Перспективный дирижабль	150	42	0,021	1900
7	ВМЛТ	6500	1800	0,014	128500

* — в пересчёте к первичным энергоносителям; ** — транспортная эффективность — отношение скорости к удельным энергозатратам.

ко и он уступает ВМЛТ по эффективности почти на порядок.

Примененный энергетический показатель при оценке транспортных систем может быть использован и при определении транзитного транспортного ресурса России.

В качестве критерия целесообразно в этом случае использовать совокупные энергозатраты на перемещение тонны груза из точки отправления в точку прибытия (в килоджоулях на тонну), т.е. $P = U_{рз} \cdot L$, где L — расстояние. Результаты сравнения двух способов доставки груза (морской и железнодорожный) для транзита Европа—Азия приведены в таблице 2 на основе данных [13]. Здесь же оценка аналогичного российского транзита Китай—Западная Европа с помощью транспортной системы ВМЛТ.

И в таблице 2 совершенно очевидно преимущество ВМЛТ на базе ЕТЗ по всем сравниваемым параметрам, причём по основному, целевому параметру, P — совокупным энергозатратам они меньше почти на порядок, т.е. почти в 10 раз лучше.

Конечно, использование только одного обобщенного энергетического показателя $U_{рз}$ (и связанного с ним модифицированного — P) недостаточно, чтобы описывать и управлять такой сложной системой, какой является транспортный комплекс. Одномерная модель для любого транспорта не в состоянии адекватно отразить сложные многомерные и динамические процессы и взаимосвязи системы. Необходимо при разработке физической экономики для транспорта (как и для

других систем жизнеобеспечения) разрабатывать целый набор взаимосвязанных и физически измеримых показателей [12].

Хотя, конечно, использование, даже в первом приближении только одного так называемого показателя «транспортной эффективности» (C) [14], равного отношению скорости ТСП в м/с к его удельным энергозатратам в [Дж/кг • м], оценивающего преимущества ТС ещё и с учётом различий в их скорости, может служить хорошим ориентиром при сравнении различных транспортных систем и их эффективности.

В таблице 3 сделано сравнение по данному критерию некоторых традиционных видов транспорта, а также и оценка режимов работы одной из перспективных конструкций дирижаблей инновационного типа и сверхвысокоскоростной, которая одновременно сочетает в себе как преимущество сверхвысокой скорости перемещения грузов, так и низких энергозатрат, или преимущества весьма высокой энергоэффективности в сочетании с быстрой транспортировкой грузов.

Из этого сравнения очевидно, что транспортная эффективность ТС ВМЛТ на несколько порядков выше транспортной эффективности всех остальных сравниваемых здесь традиционных видов транспорта и в разы выше самого эффективного из сравниваемых в таблице 3, но, пока ещё гипотетического — инерциального трубопроводного транспорта [14].

Таким образом, по уровню энергетической и транспортной эффективности ВМЛТ не имеет себе равных среди остальных



ных видов транспорта. Она вполне справедливо претендует на роль основной или центральной, магистральной ТС в ряду составляющих интегральной системы и в стратегической перспективе — среди предлагаемых к созданию инновационных транспортных систем.

Вакуумно-трубопроводная транспортная технология идеально отвечает нуждам XXI века. Она толерантна к большинству существующих транспортных, в том числе и любому типу маглев-технологий [1–4].

В общих чертах основные ее концептуальные принципы описаны в [6–11] и формулируются, например, так: в разреженной среде сдвоенного вакуумированного магистрального магнитолевитационного путепровода, располагаемого эстакадно над относительно равнинной поверхностью земли, в тоннеле под землёй или даже под поверхностью водной преграды, перемещаются на принципах бесконтактной магнитной левитации лёгкие, компактные и герметичные капсулы с размерами, оптимизированными для задач транспортировки как людей, так и грузов со скоростями вплоть до 6500 км/ч и более.

По сравнению с поездами высокоскоростной рельсовой системы, материалоемкость ВМЛТ в пересчете на одного пассажира составит менее 1/20 части материалоемкости ВСР, а по удельным энергозатратам ВМЛТ не имеет себе равных. Затраты на создание и поддержание вакуума также не столь велики и уже при КПД вакуумных насосов в районе 0,5 затраты даже на первичное, наиболее затратное вакуумирование составят не более 500 руб./км для оптимального путепровода диаметром 1500 мм.

Пропускная (провозная) способность ВМЛТ зависит от скорости капсулы. Так, для одной трубы вакуумированного путепровода при скорости 650 км/ч она может достигнуть и 260000 пассажиров или 17000 тонн грузов в час, если шлюзов будет около 300, что достаточно привлекательно для основного междугороднего сообщения мегаполисов.

При этом широко разрекламированная сейчас и просто похожая на неё технология Hyperloop гораздо более ограничена, чем конкурирующая с ней технология

ВМЛТ, по максимально возможному расстоянию до первой необходимой «технической» остановки (около 600 км), существенно ограничена по предельной, экономически оправданной (не более 1500 км) дальности поездки, поскольку капсула Hyperloop «левитирует» на «воздушной подушке» в вакуумной среде трубопровода с давлением порядка 100 Па, что гораздо менее эффективно, чем магнитная левитация [9].

Становится всё более очевидным, что сегодня фактически единственным экономически и технически приемлемым решением задачи энергоэффективного повышения скорости экологичного наземного транспорта является замена системы колесо-рельс на систему магнитного подвеса и замена обычной окружающей среды на искусственно созданную, в которой аэродинамическое сопротивление будет относительно мало. И здесь у ВМЛТ конкурентов пока практически нет.

При этом система ВМЛТ может обеспечить в 50 раз больше перевозок на 1 кВт·ч электроэнергии, чем самые эффективные электромобили или поезда, а эстакадную сеть ВМЛТ можно построить за деньги, эквивалентные 1/10 стоимости высокоскоростной рельсовой дороги или 1/4 стоимости сопоставимой высокоскоростной автостреды, при пропускной способности всего одной пары вакуумированных путепроводов, как у 32 полос магистральной высокоскоростной автостреды [6, 10].

И как уже отмечалось в [7–9], отечественными разработчиками, давно предложенными новыми экономически эффективными и энергосберегающими принципами конструирования элементов инженерных сооружений [15], различных типов силовых сверхпроводниковых кабелей для энергообеспечения комплексов оборудования сетей ВМЛТ, а также экспериментально проверенные эффективные методики помехоустойчивого управления и контроля состояния оборудования сетей на базе дальнедистанционной оптоволоконной диагностики и криогенных оптоволоконных сенсоров [16, 17], устойчиво и надёжно действующих в жёстких условиях совместного воздействия вакуума, низких (криогенных) температур, сильно-

го влияния постоянных и переменных электрических и магнитных полей оборудования ВМЛТ по всей длине трассы путипровода.

ВЫВОДЫ

1. Рассматриваемые в статье технологии и варианты дальнейшего развития высокоскоростных и сверхвысокоскоростных транспортных средств являются технически реализуемыми, экономически выгодными для России и обладают высокотехнологичными решениями в области магнитолевитационной, вакуумно-криогенной, оптоволоконной и сверхпроводниковой техники.

2. Основным сдерживающим фактором для повсеместного внедрения такой транспортной системы остается отсутствие реализованного репрезентативного и коммерчески привлекательного пилотного проекта, разработка и реализация которого стала сейчас наиболее срочной и актуальной задачей.

3. Необходимо решением правительства РФ признать важность проекта на государственном уровне и включить работы по созданию и развитию МЛТ и ВМЛТ в Стратегию развития транспорта на период до 2030 года.

ЛИТЕРАТУРА

1. Магнитолевитационная транспортная технология / Под ред. В. А. Гапановича. — М.: Физматлит, 2014. — 476 с.
2. Магнитолевитационный транспорт: научные проблемы и технические решения / Под ред. Ю. Ф. Антонова, А. А. Зайцева. — М.: Физматлит, 2015. — 612 с.
3. Магнитолевитационный транспорт в единой транспортной системе страны: Монография / А. А. Зайцев, Е. И. Морозова, Г. Н. Талашкин, Я. В. Соколова. — СПб.: НП-Принт, 2015. — 140 с.
4. Зайцев А. А. Отечественная транспортная система на основе магнитной левитации // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». — 2015. — № 6. — С. 22—27.
5. Technical-economical comparison of Maglev and High Speed Systems // The website of the Transportation and Infrastructure Committee. [Электронный ресурс]: <http://archives.republicans.transportation.house.gov/Media/File/110th/Rail/3—20—07—roundtable-Brady-dornier.pdf>. Доступ 15.09.2016.
6. The website of the Evacuated Tube Transport Technology. [Electronic resource]: <http://et3.com/>. Доступ 25.10.2016.
7. Терентьев Ю. А. Основные преимущества и особенности высокоскоростного вакуумного транспорта

«ЕТ3» // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». — 2015. — № 6. — С. 10—21.

8. Терентьев Ю. А., Фомин В. М., Наливайченко Д. Г. К вопросу выбора диапазона рабочих параметров вакуумного магнитолевитационного транспорта // XI международная научно-техническая конференция «Вакуумная техника, материалы и технология». — М., 2016. [Электронный ресурс]: <https://istina.msu.ru/collections/19819075/>. Доступ 25.10.2016.

9. Терентьев Ю. А. «Evacuated tube transport technologies» (ЕТ3) — новая транспортная парадигма XXI века // Этика, транспорт и устойчивое развитие: социальная роль транспортной науки и ответственность ученых: Международная конференция ЮНЕСКО / Под общ. ред. И. В. Карапетянц, Г. Г. Малинецкого. — М.: АИСТ, 2016. — С. 99—106.

10. ET3 online education // The website of the Evacuated Tube Transport Technology. [Электронный ресурс]: <http://et3.eu/et3-online-education.html>. Доступ 15.09.2016.

11. Островская Г. В. Магнитные дороги профессора Вейнберга (К 100-летию лекции «Движение без трения») // Вестник науки Сибири. — 2014. — № 2. — С. 6—14.

12. Дроздов Б. В. Направления разработки физической экономики (применительно к транспортному комплексу) // Устойчивое инновационное развитие: проектирование и управление. Электронное научное издание, том 10, выпуск 2(23), 2014. Материалы конференции к 90-летию П. Г. Кузнецова. [Электронный ресурс]: <http://www.rypravlenie.ru/wp-content/uploads/2014/08/05-Drozdo.pdf>. Доступ 15.09.2016.

13. Дроздов Б. В. Геостратегические проекты дальневосточного развития России // Культура. Народ. Экофера: труды социокультурного семинара имени Бугровского. — Вып. 4. — М.: Спутник+, 2009. [Электронный ресурс]: <https://refdb.ru/look/1972048-pall.html>. Доступ 15.09.2016.

14. Крюков П. В. Россия в XXI веке — центр мирового транспортного сообщения // Научно-технический отчет по теме Минпромнауки. — М., 2002.

15. Композитный несущий блок и монтажное соединение несущих блоков сборной строительной конструкции: Патент 2519021 РФ: МПК E04C1/00, E04B2/08 / авторы и заявители Фридкин В. М., Токарев П. М., Зенин А. В., Замуховский А. В., Савкин Д. А., Грудский В. А., Пономарев И. В., Цомаева К. А.; патентообладатель Московский государственный университет путей сообщения, № 2012128146/03, заявл. 06.07.2012.

16. Терентьев Ю. А. Примеры повышения энергетической эффективности проектов сверхпроводниковой криоэнергетики при использовании программы МОДЭН и оптоволоконной криодиагностики // Сб. трудов I-й и II-й Национальной конференции по прикладной сверхпроводимости НКПС-2011 и НКПС-2013. — М.: НИЦ «Курчатовский ин-т», 2014. — С. 390—397.

17. Терентьев Ю. А., Федосеев В. Н., Шелемба И. С. и др. Испытания первой отечественной системы оптоволоконной криодиагностики на эффекте Рамана для регистрации профиля распределения температуры вдоль отрезка ВТСП кабельной линии // Сб. трудов I-й и II-й Национальной конференции по прикладной сверхпроводимости НКПС-2011 и НКПС-2013. — М.: НИЦ «Курчатовский ин-т», 2014. — С. 398—405.

Координаты авторов: **Дроздов Б. В.** — drozdovbv@mail.ru, **Терентьев Ю. А.** — teren_y@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 23.12.2016, принята к публикации 28.02.2017.

