



Перспективы вакуумного магнитолевитационного транспорта



Борис ДРОЗДОВ
Boris V. DROZDOV

Юрий ТЕРЕНТЬЕВ
Yuri A. TERENTIEV



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 безаэродромных 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:

$$U_{p \text{ э}} = N/M \times V,$$

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	10000	1.1 • 10 ⁶	12 (7)
2	Морской (Китай–Финляндия)	54,3	21000	1.14 • 10 ⁶	28
3	Железнодорожный (российский транзит) (Корея–Зап. Европа)	110	11000	1.2 • 10 ⁶	14
4	Морской (Корея–Зап. Европа)	54,3	22000	1.2 • 10 ⁶	30
5	Железнодорожный (российский транзит) (Китай–Зап. Европа)	110	11000	1.21 • 10 ⁶	15
6	Морской (Китай–Зап. Европа) (Шанхай–Амстердам)	54,3	23000	1.25 • 10 ⁶	27–46
7.	Российский транзит (Китай–Зап. Европа) ТС ВМЛТ	14,05	11000	1,54 • 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. $P = Uр \cdot L$, 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 $Uр$ (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, покольку 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 предложены новые экономически эффективные и энергосберегающие принципы 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

«ET3» // 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» (ET3) – 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-rall.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.



PROSPECTS FOR VACUUM MAGNETIC-LEVITATION TRANSPORT

Drozdov, Boris V., Research Institute of Information and Analytical Technologies (NII IAT), Moscow, Russia.

Terentiev, Yuri A., official representative of ET3 in the Russian Federation, Moscow, Russia.

ABSTRACT

The authors propose a fundamentally new approach to solving the problem of overcoming the technological limits of speed growth existing for rail vehicles. The advantages of vacuum magnetic-

levitation transport are assessed in comparison with traditional transport systems. The perspectives of the use of this type of transport as applied to the development strategy of the transport system of Russia are determined.

Keywords: vacuum magnetic-levitation transport, specific energy inputs, transit transport resource, magnetic suspension, vacuum pipeline.

Background. To become a civilization center on the Eurasian continent, Russia needs to step up its participation in the implementation of geostrategic projects, the key role in which will be played by transport systems.

For modern traditional transport technologies it is already obvious that the main limiting factors and the brake on progress have been insufficient vehicle speed limits, low transport efficiency, throughput and carrying capacity of the main lines. In particular, on the railways of Russia for the initially used technology of wheel-rail movement, problems have arisen when the transport reaches two technological limits of growth in the speed of transport vehicles (TV).

The first limit is related to limiting the dynamics of acceleration and deceleration of TV, depending on adhesion of the wheel to the rail and the reliability of the current collector on a constant and alternating current. The second limit is connected with limiting the possibility of a further increase in the speed of TV to about 500 km / h, due to the growth in the third degree of energy costs to overcome the growing aerodynamic resistance to its movement.

Objective. The objective of the authors is to consider prospects for vacuum magnetic-levitation transport.

Methods. The authors use general scientific methods, comparative analysis, statistical method, economic evaluation.

Results. In the first case, the transition to contactless (maglev) or magnetic-levitation transport (MLT) principles of the organization of the movement of the TCP, which is actively developed including in our country, is seen as logical [1–4]. The advantages, disadvantages and unquestionable advantages of magnetic-levitation high-speed (about 500 km / h) technologies realized in natural «atmospheric» environmental conditions in comparison with traditional high-speed rail (HSR) technology have been examined in detail and substantiated in the works of domestic and foreign researchers [1–5].

Magnetic-levitation (MLT) «atmospheric» transport is a promising first stage in the development of high- and ultra-high-speed land transport. In the strategic perspective, the implementation of this project and its advanced domestic development of «MagTransCiTi» [1–3] in combination with vacuum magnetic-levitation technology (VMLT) [6, 7] will allow, for example, the ultra-high-speed transport connection of the water areas of the Pacific and Atlantic Oceans through the Eurasian continent across Russia and will open new opportunities for creation of intercontinental transport highways, emergence of a number of new technological solutions in the field of energy, superconductivity, cryogenics, that can significantly change the ecological situation in the

world. At the same time, Russia can realize a powerful export component in the form of a transit cargo flow, in particular, in the directions North–South, East–West between the countries of the Asia-Pacific region and Europe.

But even in the technology of «atmospheric» MLT, as the speed of motion increases, the aerodynamic resistance to the movement of TCP grows quadratically, and at the already achieved record speeds of more than 1000 km / h, the bulk of the power of the drive of TC is forced to overcome this resistance, determining the limits of applicability of this progressive technology.

We propose a fundamentally new approach to solving the problem of overcoming both the first and second limits of the increase in the speed of TCP on the basis of the obvious advantages of «vacuum pipeline transport technology» (BT3) [6–9].

The concept of VLMT for this technology is an example of the effective convergence of magnetic-levitation, superconducting and vacuum technologies for land transport, which allows it to reach a speed of about 6500 km / h and more, with a very high throughput capacity, an acceptable cost of moving passengers and cargo, as well as a record low energy costs. Thus, according to the data [8, 10], the transportation of 1800 passengers to a distance of 1 km requires an energy expenditure of between 1 kW·h and 0.004 kWh / ton·km for cargo delivery.

The basic principles of the symbiosis of two ideas – the concept of transport on a magnetic suspension and in an artificially created rarefied vacuum medium inside a sealed pipeline – were first formulated, developed and published by the Russian scientist–geophysicist B. P. Weinberg [11] and later developed and described in [6–10].

In this article, on the basis of the above-mentioned principle, a large-scale infrastructure project is being considered to create a new integrated transport system (TS) in the strategic perspective that will, in particular, solve the problem of transport accessibility in the countries of the Eurasian Union by combining the currently available traditional modes of transport and new zero-flight amphibious, screen planes, balloon and other innovative means of transport.

Let us compare the various transport systems for such an important quantitative indicator as the unit energy consumption per unit of cargo transportation per unit of distance (in kilojoules per ton km) in terms of the so-called «physical economy». The main energy criterion of transportation here is the criterion of specific energy costs for the transportation of a unit of cargo weight per unit of distance [12]. This criterion, designated *Ure* (specific energy expenditure), has the dimension kJ / ton. The value of *Ure* is given by the formula:

Energy indicators of various transport systems

№	Transport system	Type of transport	Power, MW	Speed, m/sec	Weight of useful cargo, t	Ур • е KJ / t • km
1	Boeing-747	Air	71	253	64	4 380
2	Screen plane «Lun'»	Air	137	138	120	8 333
3	Freight train	Rail	4,4	20,0	2000	110
4	HSR- main line TGV	Rail	8,8	83,3	50	2 173
5	Autotrailer	Automobile	0,338	22,2	20	761
6	STU	String	0,040	3,3	4	120
7	Autoferry	Sea	17,6	10,8	3345	487
8	HFV «Vikhr'»	Sea	3,5	19,4	26	7 009
9	VMLT	VMLT	0,5 (имп., 16 сек.)	180	0,4	14,05

Designations: HSR – high-speed main line; TGV – type of West European HSR; STU – string transport of Unitsky; HFV – hydrofoil vessel.

Table 2

Aggregate specific energy consumption and delivery time for various TS and modes of transportation of goods

N	Type of transit	U re, (kJ / t • km)	L, (km)	P, (kJ/t)	Cargo delivery time (days)
1	Railway (Russian transit) (China–Finland)	110	10 000	$1.1 \cdot 10^6$	12 (7)
2	Sea (China–Finland)	54,3	21 000	$1.14 \cdot 10^6$	28
3	Railway (Russian transit) (Korea–Western Europe)	110	11 000	$1.2 \cdot 10^6$	14
4	Sea (Korea–Western Europe)	54,3	22 000	$1.2 \cdot 10^6$	30
5	Railway (Russian transit) (China–Western Europe)	110	11 000	$1.21 \cdot 10^6$	15
6	Sea (China–Western Europe) (Shanghai–Amsterdam)	54,3	23 000	$1.25 \cdot 10^6$	27–46
7.	Russian transit (China–Western Europe) TS VMLT	14,05	11 000	$1,54 \cdot 10^5$	0,1

$Ure = N/M \times V$,

where N is the useful power of the traction machine (traction motor) of the transport system, in kilowatts ($1 \text{ kW} = \text{kJ/s}$);

M is the mass of the goods carried, in tonnes;

V is the speed at which the cargo is transported by the transport system, km/sec.

With the help of specific energy consumption indicator Ure , it is possible to solve the problem of determining the prospective directions for the development of various modes of transport, including VMLTS. Table 1, based on the data of [13], shows the results of the comparison for the Ure indicator of traditional and prospective modes of transport, including ground, sea (water) and air, and below there is the estimate for VMLT.

As can be seen from Table 1, without taking into account VMLT, the best parameters of energy efficiency (but not always with a comparable speed of transportation) have a classical type of railway transport according to the chosen criterion, but it is inferior to VMLT in efficiency by almost an order of magnitude.

The energy indicator used in the assessment of transport systems can also be used to determine the transit transport resource of Russia.

As a criterion, it is advisable in this case to use the total energy input for moving a ton of cargo from the point of departure to the point of arrival (in kilojoules per tonne), i.e. $P = Ure \times L$, where L is the distance. The

results of comparison of two modes of shipping (sea and rail) for the Europe–Asia transit are shown in Table 2, based on the data of [13]. Here, there is also assessment of a similar Russian transit of China–Western Europe by means of the VMLT transport system.

And in Table 2, the advantage of VLMT based on ET3 on all compared parameters is quite obvious, and for the main, target parameter, P – total energy costs, they are less by almost an order of magnitude, i.e. almost 10 times better.

Of course, the use of only one generalized energy indicator of Ure (and the associated modified one – P) is not enough to describe and manage such a complex system as a transport complex. A one-dimensional model for any transport is not able to adequately reflect the complex multi-dimensional and dynamic processes and interrelationships of the system. It is necessary to develop a whole set of interrelated and physically measurable indicators when developing the physical economy for transport (as for other life support systems) [12].

Although, of course, the use, even in the first approximation, of only one so-called indicator of «transport efficiency» (C) [14], equal to the ratio of the speed of TV in m/s to its specific energy consumption in $[J/kg \cdot m]$, assessing the advantages of TV also with account of differences in their speed, can serve as a good guide for comparing different transport systems and their efficiency.



Comparative characteristics of various modes of transport

N	Type of transport	Average speed, km/h	Average speed, m/s	Specific energy costs, J/kg • m (MJ/t • km)*	Transport efficiency**
1	Railway	60	17	0,15	100
2	Sea transport	40	11	0,08	125
3	Car	100	28	2,0	15
4	Aircraft	700	194	2,2	90
5	Inertial pipeline transport	500	139	0,009	16000
6	Promising airship	150	42	0,021	1900
7	VMLT	6500	1800	0,014	128500

* – in terms of primary energy sources; ** – transport efficiency – ratio of speed to specific energy consumption.

Table 3 compares this criterion for some traditional modes of transport, as well as an assessment of the operating modes of one of the promising designs of airships of innovative type and ultra-high-speed, which simultaneously combines both the advantage of ultra-high speed of cargo movement and low energy costs, or the advantages of very high energy efficiency in combination with rapid transportation of goods.

From this comparison, it is obvious that the transport efficiency of the TS VMLT is several orders of magnitude higher than the transport efficiency of all other traditional modes of transport compared here, and several times higher than the most efficient of inertial pipeline transport compared in Table 3, but still hypothetical [14].

Thus, according to the level of energy and transport efficiency, VMLT has no equal among other modes of transport. It quite rightly claims the role of the main or central, backbone TS in a number of components of the integrated system and in a strategic perspective – among the innovative transport systems proposed for creation.

Vacuum-pipeline transport technology is ideally suited to the needs of XXI century. It is tolerant to the majority of existing transport, including any type of maglev-technology [1–4].

In general, its main conceptual principles are described in [6–11] and are formulated, for example, in the following way: in a permitted environment of a double vacuumed main magnetic-levitation viaduct, located as an overpass over a flat part of the ground, in a tunnel under ground or even under a water obstacle, lightweight, compact and airtight capsules with dimensions optimized for the transport of both people and goods move at speeds up to 6500 km / h or more based on the principles of non-contact magnetic levitation.

Compared with trains of the high-speed rail system, the material capacity of VMLT in terms of one passenger is less than 1/20 of the material capacity of the HSR, and according to the specific energy consumption, VMLT has no equal. The cost of creating and maintaining a vacuum is also not so great and already with the efficiency of vacuum pumps in the region of 0,5 the costs for the initial pumping will be not more than 500 rub./km for an optimum overpass with a diameter of 1500 mm.

The throughput (carrying capacity) of VMLT depends on the speed of the capsule. So, for one pipe of an evacuated overpass at a speed of 650 km / h, it can reach 260 000 passengers or 17 000 tons of cargo per hour, if there are about 300 gateways, which is attractive enough for the main long-distance communication of megacities.

At the same time, Hyperloop technology widely advertised now and just similar to it is much more limited than the competing VLMT technology, for the maximum possible distance to the first necessary «technical» stop (about 600 km), is substantially limited in terms of marginal, economically justified (no more than 1500 km) range of travel, since the Hyperloop capsule «levitates» on the «air cushion» in the vacuum environment of the pipeline with a pressure of about 100 Pa, which is much less efficient than magnetic levitation [9].

It is becoming increasingly clear that today, in fact, the only economically and technically acceptable solution to the problem of energy-efficient speeding up of environmentally friendly land transport is to replace the wheel-rail system with a magnetic suspension system and replace the conventional environment with an artificially created one, in which the aerodynamic resistance will be relatively small. And here VMLT has practically no competitors.

At the same time, the VMLT system can provide 50 times more traffic per 1 kWh of electric power than the most efficient electric cars or trains, and the VMLT overpass can be built for money equivalent to 1/10 of the cost of a high-speed railroad or 1/4 of the cost of a comparable high-speed motorway, with the capacity of only one pair of evacuated overpasses, as in the 32 lanes of the main high-speed motorway [6, 10].

And as already noted in [7–9], domestic developers have long proposed new cost-effective and energy-saving principles for designing the elements of engineering structures [15], various types of power superconducting cables for power supply of VLMT network equipment complexes, and also experimentally tested effective methods of noise-immune control and monitoring of the state of equipment networks based on long-distance fiber optic diagnostics and cryogenic fiber sensors [16, 17], which are stable and reliable operating in the rigid conditions of the combined impact of vacuum, low (cryogenic) temperatures, strong influence of permanent and alternating electric and magnetic fields of the equipment of VMLT along the entire length of the overpass route.

Conclusions.

1. The technologies and the options for further development of high-speed and ultra-high-speed vehicles, considered in the article, are technically feasible, economically viable for Russia and possess high-tech solutions in the field of magnetic-levitation, vacuum-cryogenic, fiber-optic and superconducting technology.

2. The main constraint for the widespread introduction of such a transport system remains the lack of a realized representative and commercially

attractive pilot project, the development and implementation of which has now become the most urgent task.

3. It is necessary that the government of the Russian Federation recognize the importance of the project at the state level and include work on the creation and development of MLT and VMLT in the Transport Development Strategy for the period until 2030.

REFERENCES

1. Magnetic levitation transport technology [Magnitolevitacionnaja transportnaja tehnologija]. Ed. by V. A. Gapanovich. Moscow, Fizmatlit publ., 2014, 476 p.

2. Magnetic-levitation transport: scientific problems and technical solutions [Magnitolevitacionnyj transport: nauchnye problemy i tehničeskie rešenija]. Ed. by Yu. F. Antonov, A. A. Zaitsev. Moscow, Fizmatlit publ., 2015, 612 p.

3. Magnetic-levitation transport in the united transport system of the country: Monograph [Magnitolevitacionnyj transport v edinoj transportnoj sisteme strany: Monografija]. A. A. Zaitsev, E. I. Morozova, G. N. Talashkin, Ya. V. Sokolova. St. Petersburg, NP-Print publ., 2015, 140 p.

4. Zaitsev, A. A. National transport system based on magnetic levitation [Otečestvennaja transportnaja sistema na osnove magnitnoj levitacii]. Bjulleten' Ob'edinennogo učenogo sověta OAO «RZhD», 2015, Iss. 6, pp. 22–27.

5. Technical-economical comparison of Maglev and High Speed Systems // The website of the Transportation and Infrastructure Committee. [Electronic resource]: <http://archives.republicans.transportation.house.gov/Media/File/110th/Rail/3–20–07–roundtable-Brady-dornier.pdf>. Last accessed 15.09.2016.

6. The website of the Evacuated Tube Transport Technology. [Electronic resource]: <http://et3.com/>. Last accessed 25.10.2016.

7. Terentiev, Yu. A. The main advantages and features of high-speed vacuum transport ET3 [Osnovnye preimushhestva i osobennosti vysokoskorostnogo vakuumnogo transporta «ET3»]. Bjulleten' Ob'edinennogo učenogo sověta OAO «RZhD», 2015, Iss. 6, pp. 10–21.

8. Terentiev, Yu. A., Fomin, V. M., Nalivaychenko, D. G. On the choice of the range of operating parameters of vacuum magnetic levitation transport [K voprosu vybora diapazona rabočih parametrov vakuumnogo magnitolevitacionnogo transporta]. XI International Scientific and Technical Conference «Vacuum Machinery, Materials and Technology». Moscow, 2016. [Electronic resource]: <https://istina.msu.ru/collections/19819075/>. Last accessed 25.10.2016.

9. Terentiev, Yu. A. «Evacuated tube transport technologies» (ET3) – a new transport paradigm of the XXI century [«Evacuated tube transport technologies» (ET3) – novaja transportnaja paradigma XXI veka]. Ethics, transport and sustainable development: the social role of transport science and the responsibility of scientists: UNESCO International Conference. Ed. by I. V. Karapetyants, G. G. Malinetskiy. Moscow, AISnT publ., 2016, pp. 99–106.

10. ET3 online education // The website of the Evacuated Tube Transport Technology. [Electronic resource]: <http://et3.eu/et3-online-education.html>. Last accessed 15.09.2016.

11. Ostrovskaya, G. V. Magnetic roads of professor Weinberg (To the 100th anniversary of the lecture «Movement without friction») [Magnitnye dorogi professora Vejnberga (K 100-letiju lekcii «Dvizhenie bez trenija»)]. Vestnik nauki Sibiri, 2014, Iss. 2, pp. 6–14.

12. Drozdov, B. V. Directions of development of physical economy (with reference to the transport complex) [Napravlenija razrabotki fizičeskoj ekonomiki (primeritel'no k transportnomu kompleksu)]. Sustainable innovative development: design and management. Electronic scientific publication, Vol. 10, Iss. 2 (23), 2014. Proceedings of the conference for the 90th anniversary of P. G. Kuznetsov. [Electronic resource]: <http://www.rypravlenie.ru/wp-content/uploads/2014/08/05-Drozdov.pdf>. Last accessed 15.09.2016.

13. Drozdov, B. V. Geostrategic projects of the Far East development of Russia [Geostrategičeskie proekty dal'nevostočnogo razvitiya Rossii]. Kul'tura. Narod. Eekosfera; trudy sociokul'turnogo seminaru imeni Bugrovskogo, Iss. 4. Moscow, Sputnik+ publ., 2009. [Electronic resource]: <https://refdb.ru/look/1972048-pall.html>. Last accessed 15.09.2016.

14. Kryukov, P. V. Russia in the XXI century – the center of the world's transport communication [Rossija v XXI veke – centr mirovogo transportnogo soobshhenija]. Nauchno-tehničeskij otčet po teme Minpromnauki. Moscow, 2002.

15. Composite bearing block and assembly connection of bearing blocks of a prefabricated building structure: Patent 2519021 RF: IPC E04C1/00, E04B2/08 / authors and applicants Fridkin, V. M., Tokarev, P. M., Zenin, A. V., Zamukhovskij, A. V., Savkin, D. A., Grudskij, V. A., Ponomarev, I. V., Tsomaeva, K. A.; Patent holder Moscow State University of Railway Engineering, No. 2012128146/03, appl. 06.07.2012 [Kompozitnyj nesushhij blok i montazhnoe soedinenie nesushhijh blokov sbornoj stroitel'noj konstrukcii: Patent 2519021 RF: MPK E04C1/00, E04B2/08 / avtory i zajaviteli Fridkin, V. M., Tokarev, P. M., Zenin, A. V., Zamukhovskij, A. V., Savkin, D. A., Grudskij, V. A., Ponomarev, I. V., Tsomaeva K. A.; patentobladatel' Moskovskij gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija, № 2012128146/03, zajavl. 06.07.2012].

16. Terentiev, Yu. A. Examples of increasing the energy efficiency of superconductor cryoenergetics projects using the MODEN program and fiber-optic cryodiagnosics [Primery povyšhenija energetičeskoj effektivnosti proektov sverhprovodnikovoj kriojenergetiki pri ispol'zovanii programmy MODEN i optovoloknojj kriodiagnostiki]. Proceedings of I and II National Conference on Applied Superconductivity of NKPS-2011 and NKPS-2013. Moscow, SRC Kurchatov Institute, 2014, pp. 390–397.

17. Terentiev, Yu. A., Fedoseev, V. N., Shelemba, I. S. et al. Tests of the first domestic system of fiber-optic cryodiagnosics on the Raman effect for recording the profile of the temperature distribution along a segment of high-voltage superconducting cable line [Ispytanija pervoj otečestvennoj sistemy optovoloknojj kriodiagnostiki na effekte Ramana dlja registracii profilja raspredelenija temperatury vdol' otrezka VTSP kabel'noj linii]. Proceedings of I and II National Conference on Applied Superconductivity of NKPS-2011 and NKPS-2013. Moscow, SRC Kurchatov Institute, 2014, pp. 398–405. ●

Information about the authors:

Drozdov, Boris V. – D.Sc. (Eng.), general director of Research Institute of Information and Analytical Technologies (NII IAT), Moscow, Russia, drozdovbv@mail.ru.

Terentiev, Yuri A. – independent expert, official representative of ET3 in the Russian Federation, Moscow, Russia, teren_y@mail.ru.

Article received 23.12.2016, accepted 28.02.2017.

