



Hyperloop: технические риски и перспективы



Андрей СМИРНОВ
Andrey V. SMIRNOV

Сергей ЕГОШИН
Sergey F. EGOSHIN



Смирнов Андрей Валентинович — кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника отделения Центрального аэрогидродинамического института им. А. Е. Жуковского (ЦАГИ), Жуковский, Московская область, Россия.

Егошин Сергей Фёдорович — инженер ЦАГИ, Жуковский, Московская область, Россия.

Hyperloop: technical risks and prospects
(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 75)

Статья посвящена техническому анализу проекта высокоскоростного наземного транспорта Hyperloop, интерес к строительству которого в последнее время значительно вырос. Кратко рассмотрены базовые технологии, с помощью физических расчётов уточнены основные конструкционные характеристики. Выявлены технические риски, некоторые из которых могут повлиять на первоначальную конфигурацию проекта, а другие ставят под сомнение саму возможность его реализации. Проведенные исследования позволяют дать заключение о целесообразности дальнейшей работы по созданию высокоскоростной транспортной системы Hyperloop и сформулировать перечень первоочередных научно-исследовательских задач, которые необходимо осуществить, чтобы проект стал успешным.

Ключевые слова: Hyperloop, вакуумный путепровод, челнок, высокоскоростной транспорт, транспортные системы будущего, новые технологии, технические риски.

Рост численности населения Земли неизбежно приводит к обострению различного рода проблем, в том числе транспортных. Поиск решения этих проблем происходит как посредством модернизации существующей транспортной инфраструктуры, так и создания новых систем.

В этом ключе проект Hyperloop вызывает большой интерес во многих странах мира, где географические условия требуют дальнейшего развития транспорта, наличия максимально доступной и высокоскоростной системы перемещения грузов и пассажиров, позволяющей значительно улучшить взаимосвязанность регионов и отдельных территорий внутри государственных субъектов.

КРАТКАЯ ПРЕДЫСТОРИЯ ПРОЕКТА

Проект Hyperloop был представлен Илоном Маском (Elon Musk) в 2013 году и изначально предложен к реализации в штате Калифорния (США). В его основу заложена оригинальная комбинация технических решений с участием трубопроводного транспорта, аэрокосмических технологий и альтернативного

Затраты на перевозку 1 пассажира (усл. ед.) и скорость перемещения по видам транспорта



Рис. 1. Задекларированные технико-экономические характеристики Hyperloop.

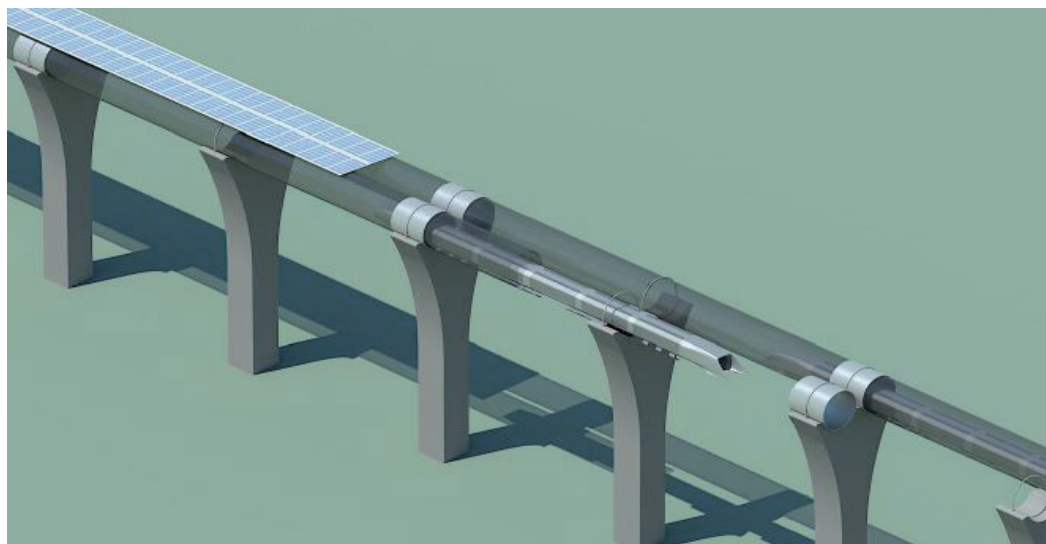


Рис. 2. Общий вид фрагмента пути Hyperloop.

источника энергии — солнечного излучения.

Необходимо отметить, что идея трубопроводного грузопассажирского транспорта (иначе говоря, транспорта, использующего герметичную протяженную трубу с разряженным воздухом как оболочку пути для перемещения объектов между двумя пунктами сообщения) не нова. Она возникла в конце XVIII века и нашла свое воплощение в виде пневмопочты, которая существует и поныне, например, в Российской государственной библиотеке, а также различных опытных образцов, в числе которых:

- пневматические железные дороги Томаса Раммелля (Лондон, 1864 год) и компании «Бич Пневматик Транзит» (Нью-Йорк, 1870 год);
- вакуумные поезда на магнитной подушке Кемпера (Германия, 1934 год) и Одзавы (Япония, 1969 год).

К XX веку развитие технологий позволило привести в идею трубопроводного транспорта новые составляющие, которые дают основание говорить о Hyperloop как новом виде транспорта, а по заявлениям самого Маска — как революционном прорыве в организации транспортных перевозок (рис. 1).

Ниже приведен технический анализ проекта. За основу взят предварительный концепт Hyperloop [1]. Большинство ключевых характеристик перепроверено.

АНАЛИЗ ГОТОВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ

Hyperloop — это высокоскоростная грузопассажирская транспортная система, состоящая из следующих основных частей.

Путепровод: стальные цилиндрические трубы диаметром 2–3 м и с толщиной стенки 2–2,5 см, сваренные в два трубопровода





Рис. 3. Схематическое устройство пассажирского челнока Hyperloop.

(один — для движения «туда», другой — для движения «обратно») и установленные на бетонные опоры высотой 6–30 м (рис. 2). Внутри труб челноки с пассажирами движутся от станции до станции с заявленной периодичностью 2 минуты. Технология строительства нагруженных трубопроводов давно отработана, например, в нефтегазовой промышленности, и особых сложностей в этом не предвидится.

Система обеспечения низкого вакуума в трубопроводе: комплект вакуумных насосов, с помощью которых внутри герметичных труб создается и поддерживается давление в 100 Па, так называемый форвакуум. Эта система достаточно легко реализуема, так как современные промышленные вакуумные насосы имеют умеренную стоимость, обладают высокой надёжностью и достаточной производительностью (~1 куб. м/с при указанном давлении на выходе).

Станции: сооружения, внутри которых происходит посадка/высадка пассажиров, перезарядка системы охлаждения и аккумуляторных батарей транспортных челноков. От обычных посадочных станций отличаются наличием системы быстрого действия шлюзов на стыке с основным трубопроводом.

Грузопассажирские челноки: парк однотипных транспортных средств, каждое из которых имеет цилиндрическую форму, длину порядка 30 м и площадь поперечного сечения около 1,4 кв. м. Конструктивно челнок близок к фюзеляжам современных самолетов. Движение челноков внутри трубопровода на основном участке пути происходит по принципу судна на воздушной подушке (СВП), то есть без использования колес (рис. 3). Воздух на опоры воздушной поддержки подается с помо-

щью лобового воздухозаборника и осевого компрессора, приводимого в действие от бортовых аккумуляторов.

Система разгона и торможения челноков: построена на использовании принципа электромагнитной индукции для линейных ротора и статора, при этом статор крепится на стенках трубопровода, а ротор — под днищем челнока. Разгон происходит на участке длиной около 10 км, примыкающем к станции, далее челнок движется по инерции (что допустимо в условиях форвакуума с минимальными потерями энергии), аналогично происходит и торможение. Время разгона/торможения, при условии относительно комфортной переносимости пассажиром горизонтального ускорения в 0,5 g, составляет около 1 минуты. Несмотря на то, что электромагнитная индукция используется повсеместно во всех областях, где применяются электродвигатели или электрогенераторы, в описанной конфигурации — линейные ротор и статор — названный физический принцип только начинает утверждаться. Однако его успешная осуществимость уже доказана в военной области (электромагнитная катапульта EMALS авианосца «Джеральд Р. Форд» [2], электромагнитные пушки).

Система энергоснабжения: ряды солнечных батарей, смонтированных над треками. Заложенная в проект мощность, генерируемая такими батареями, составляет 120 Вт/кв. м, что дает суммарную мощность до 285 МВт на пике солнечной активности, или 57 МВт в среднесуточном исчислении, и это полностью покрывает энергетические потребности Hyperloop в 21 МВт [1]. Избыток поглощенной солнечной энергии и энергия, конвертируемая в электрическую при торможении

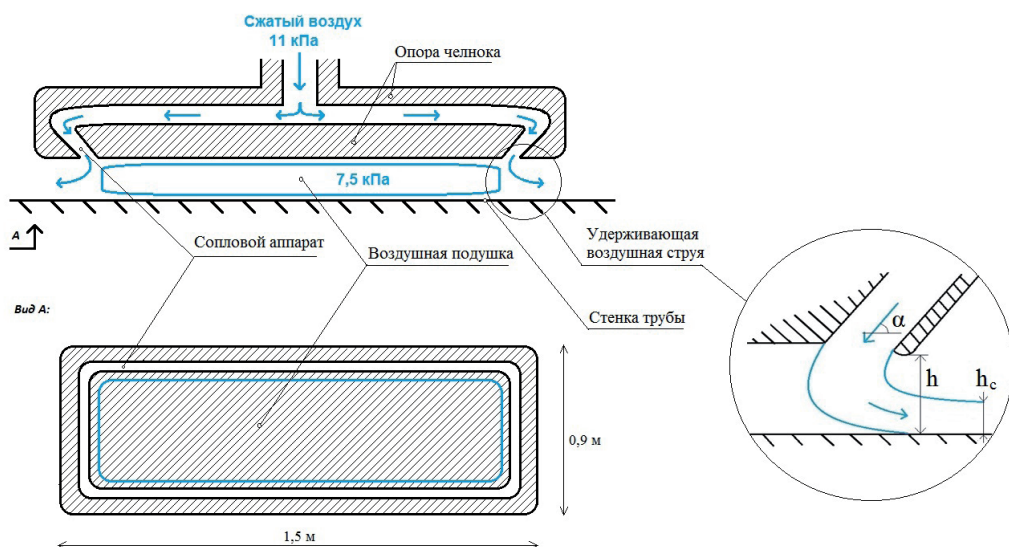


Рис. 4. Устройство воздушной опоры челока Hyperloop.

челока, хранятся в стационарных аккумуляторных батареях, что позволяет достичь заявленных в проекте характеристик энергобаланса.

АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ РИСКОВ

Как видно, проект представляет собой комбинацию ранее известных и в той или иной степени освоенных технологий. Однако кажущаяся простота не должна вводить в заблуждение: на стыке этих технологий рождаются некоторые новые технические решения, требующие серьезного исследования до начала строительства трассы Hyperloop.

1) Устойчивость поддерживающей воздушной подушки в форвакууме.

Главными отличиями поддерживающей воздушной подушки Hyperloop от других областей, в которых применяется технология СВП, являются высокая скорость движения и наличие форвакуума в качестве окружающей среды вместо обычной атмосферы. К сожалению, концепт [1] не содержит подробного описания воздушных опор, а только отдельные технические подробности конструкции и характеристики воздушной подушки. Поэтому будем полагать, что используется наиболее оптимальный вариант, взятый от реальных СВП – сопловая схема с периферийными жесткими соплами (рис. 4).

Вес челока Hyperloop удерживается за счёт давления воздуха в воздушных подуш-

ках, создаваемого под 28 опорами по 1,35 кв. м каждая. Суммарная площадь опор в проекции на горизонтальную плоскость – примерно 32 кв. м, и смонтированы они попарно вдоль всей длины челока (14 пар).

По терминологии СВП [3] зазор между опорой и стенкой трубы h называется высотой парения, и он принципиально отличается от толщины истекающей в окружающее пространство удерживающей струи h_c . В [1] указывается, что $h \sim 0,9$ мм, и не указываются причины выбора такой высоты парения, хотя дополнительно отмечается, что при скорости движения челока 1200 км/ч (или ≈ 330 м/с) и давлении окружающего форвакуума 100 Па на вход воздухозаборника челока поступает воздух в количестве 0,49 кг/с, а для удержания воздушных подушек под всеми 28 опорами достаточно 0,2 кг/с.

Одним из факторов, определяющим высоту парения, как раз является толщина удерживающей струи h_c . Связь между h и h_c задается выбором угла наклона сопла α и определяется с помощью графика (рис. 5) [4].

В дальнейших расчётах будем упрощенно считать, что $h_c \sim 0,5 h$.

Уравнение баланса входящей и выходящей массы воздуха дает толщину струи

$$h_c = \frac{m_{\text{вых}}}{V_c L_{\text{пер}} \rho_c N_{\text{оп}}}, \quad (1)$$

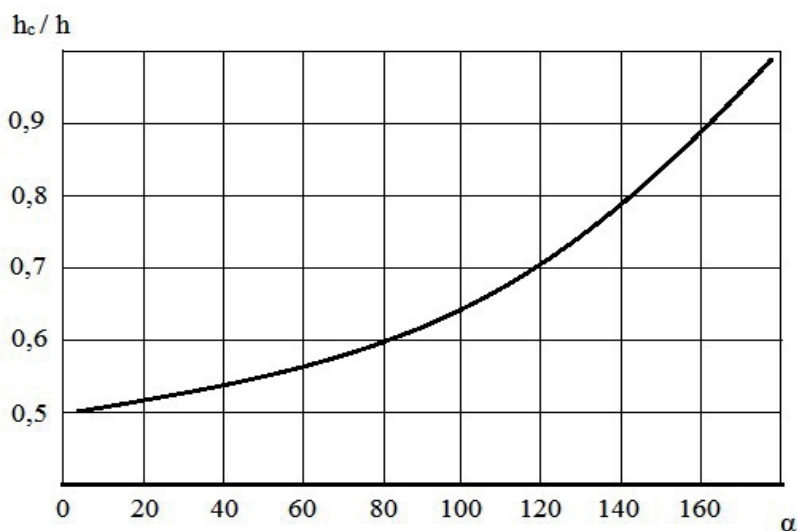


Рис. 5. Взаимосвязь параметров соплового аппарата воздушной опоры.

где V_c — скорость течения воздушной струи, ρ_c — плотность воздуха струи, $N_{оп}$ — количество воздушных опор, $L_{пер}$ — периметр воздушной подушки (~ 3 м).

Поскольку истечение струи происходит в форвакуум, на выходе из-под воздушной опоры скорость истекания V_c достигает критической V^* . Предполагая, что воздушные каналы, ведущие от баллона со сжатым воздухом к воздушным опорам, спроектированы оптимально, что по опыту конструирования СВП даёт потери давления порядка 30 % [3], а также полагая, что течение газа ламинарное (необходимое условие устойчивого удержания воздушной подушки) и вязкое (что в среднем замедляет струю в 2 раза, $V_c \approx 0,5V^*$), пользуясь гидродинамическими уравнениями течения сжимаемого газа, получаем, что $V_c \approx 170$ м/с, $\rho_c \approx 0,035$ кг/м³, и из (1): $h_c \approx 0,001$ м, или $h \approx 0,002$ м (2 мм).

Казалось бы, средняя высота парения челнока может быть увеличена более чем вдвое. В действительности определяющим фактором для ламинарного течения подобной удерживающей струи является число Рейнольдса:

$$Re = \frac{V_c \cdot h_c}{\nu}, \quad (2)$$

где V_c — средняя скорость течения струи, h_c — характерный линейный размер, в нашем случае — толщина струи, $\nu \sim 0,0006$ м²/с — кинематический коэффициент вязкости воздуха в струе с описанными в [1] параметрами.

Для течений с наиболее близкой геометрической конфигурацией критическое значение $Re_{кр} \sim 420$ [5]. Тогда из (2) следует: чтобы течение удерживающей струи носило ламинарный характер, необходимо уменьшить зазор между опорой и стенкой как минимум в 2 раза, то есть до приведенной в [1] величины $h \sim 0,9$ мм. И это ограничение непреложно.

Напомним, что приведенные теоретические выкладки построены при ряде предположений, обуславливающих устойчивость воздушной подушки. Более того, в отчёте НАСА [6], посвященном проблематике Hyperloop, отмечается, что именно наличие форвакуума способствует формированию устойчивого течения воздуха под воздушной опорой, и течение не распадается на обособленное движение отдельных молекул. Движение опоры относительно стенки трубы приводит только к искривлению подушки силами трения в сторону, противоположную направлению движения, но опять же не приводит к разрушению подушки [1].

Для проверки правильности этих утверждений нужны не только достоверное численное моделирование, но и проведение ряда экспериментов в форвакууме с движущимися СВП, что является новым в науке и технике.

2) Автономная система охлаждения.

Поскольку челнок движется в среде, близкой к состоянию вакуума, а на борту челнока работают различные агрегаты

и системы, требуется создание бортовой автономной системы охлаждения.

Задача создания подобной системы отличается новизной, ибо до этого на всех пассажирских транспортных средствах отвод тепла производился в окружающую среду.

Дело в том, что за время движения челнока выделяется большое количество теплоты (порядка 100 МДж на 100 км пути), которую следует отводить от компрессоров, опор воздушных подушек, кондиционеров салона и других работающих агрегатов, иначе они будут разогреваться до температур порядка 700°C. Поскольку челнок движется в форвакууме, то осуществить теплопередачу в окружающую среду, во-первых, крайне проблематично — суммарная теплоёмкость форвакуума невелика, а во-вторых (даже если бы первое было возможным), уже второй челнок, идущий за первым, двигался бы в нерасчётном режиме — в разогретом до более 100°C форвакууме. И так кумулятивно по нарастающей для третьего, четвертого, пятого...

Чтобы избежать кумулятивного теплового эффекта, на борту челнока установлена единая сеть теплообменников, через трубопроводы связанных с центральным теплообменником, в котором имеется запас воды $m_{\text{воды}} = 290$ кг.

Конструкция системы охлаждения в первоначальной конфигурации предположительно предусматривает нагрев воды до 100°C, парообразование и дальнейший нагрев пара до 125°C. Суммарная теплоёмкость такой системы:

$Q_{\text{ч}} = m_{\text{воды}} (C_{\text{воды}} \Delta T_1 + C_{\text{пар}} + C_{\text{р пар}} \Delta T_2),$ (3)
где $C_{\text{воды}} = 4180$ Дж/(кг К) — удельная теплоёмкость воды;

$\Delta T_1 = 75$ К — изменение температуры воды при нагревании её до 100°C;

$C_{\text{пар}} = 2260$ кДж/К — удельная теплота парообразования;

$C_{\text{р пар}} = 2020$ Дж/(кг К) — удельная теплоёмкость водяного пара;

$\Delta T_2 = 25$ К — изменение температуры пара при нагревании до 125°C.

Расчёт теплоёмкости такой системы охлаждения даёт $Q_{\text{ч}} = 760$ МДж, и этого с запасом хватает, чтобы обеспечить движение челнока на участке длиной 660 км без остановок (Москва—Санкт-Петербург). Причем запас задан в целях безопасности

на случай аварийных ситуаций, когда движение челноков прекращается и пассажирам в ожидании эвакуации приходится проводить в челноках гораздо больше время, чем запланировано, а система жизнеобеспечения (кондиционеры) должна при этом работать без сбоев.

Однако в [1] явно не говорится, что вода как охлаждающее вещество переходит из жидкого состояния в парообразное, хотя и употребляется слово «steam» — «пар». Чтобы в этом случае система охлаждения работала, её необходимо разбить на подсистемы: в одной происходит нагрев охлаждающей воды, в другой — охлаждение посредством испарения, в третьей — нагрев уже водяного пара. В настоящее время не существует агрегатов подобного уровня сложности; гораздо проще увеличить давление в системе и количество охлаждающего вещества без превращения его в другое состояние.

Кроме того, как справедливо отмечено [6], ёмкости с перегретым паром увеличили бы длину челнока на несколько десятков метров.

Поэтому, чтобы упростить функционирование транспортной системы в свете проблемы охлаждения движущегося челнока, существуют обязательные промежуточные станции, предусмотренные проектом через каждые 110 км. На одном таком участке пути выделяется до 100 МДж, и это количество теплоты вполне может быть поглощено указанным запасом воды без парообразования.

При остановках на этих станциях должна происходить перезарядка системы охлаждения: опустевший бак с водой и бак с горячей водой заменяются соответственно на полный бак холодной воды и пустой бак.

Однако посмотрим, как это скажется на характеристиках движения челнока (рис. 6).

И в том, и в другом случаях суммарная площадь под кривой даёт путь в 550 км. Вместе с тем, как видно, необходимость промежуточных остановок значительно уменьшает среднюю скорость движения челноков — до 750 км/ч. И тогда реальное сравнение скоростей, в отличие от рекламного (рис. 1), должно соответствовать рис. 7.



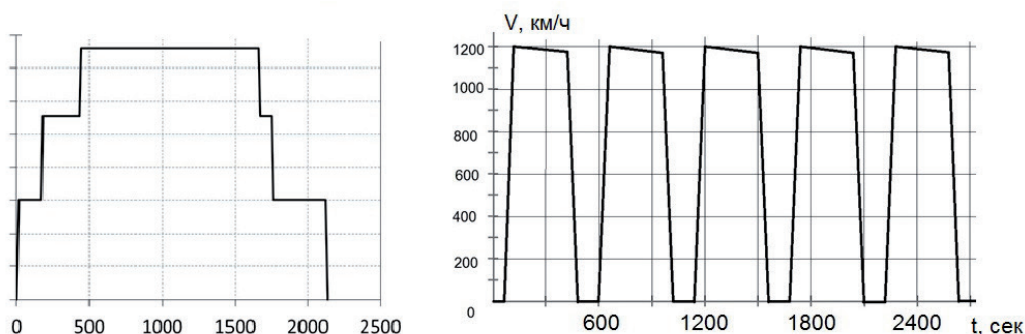


Рис. 6. Рекламный [1] и реальный графики скорости челнока на участке Лос-Анжелес–Сан-Франциско, $S = 550$ км.

Таким образом, Hyperloop не имеет революционного выигрыша по скорости перемещения пассажиров, как заявлено в концепте [1], а постоянные разгоны и торможения крайне отрицательно сказываются на комфорте поездки.

Впрочем, надо отметить, что челнок может быть перепроектирован с целью обеспечения безостановочного движения. В этом случае его масса увеличится примерно на 10 %, что приведет к незначительному изменению прочих параметров и характеристик движения и заметно усложнит технику перезарядки системы охлаждения (вместо бака с водой в 290 кг будет монтироваться бак с 1500 кг воды, к тому же разогретый почти до температуры кипения).

3) Трансзвуковое движение тел в канале со сжимаемой средой.

Долговременное движение тела в трубе со сжимаемой средой при скорости, близкой к скорости звука (скорость распространения возмущений), является новой технической задачей, решать которую ранее не требовалось, так как не существует транспортных систем, в состав которых входило бы подобное движение.

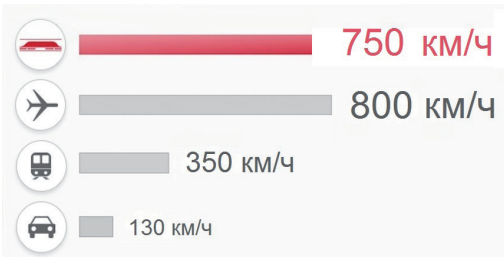


Рис. 7. Реальное сравнение скоростей перемещения Hyperloop и прочих видов транспорта.

В [1] указано, что в варианте с сугубо пассажирскими челноками труба имеет внутренний диаметр 2,23 м (или площадь поперечного сечения – 3,9 кв. м), в то время как челнок – около 1 м (1,4 кв. м соответственно мидель челнока).

Такое соотношение диаметров челнока и трубы является оптимальным для трансзвукового движения поршня диаметром d в полном цилиндре с диаметром стенок D , наполненном сжимаемой средой (условно – задача «шприц»). Рассмотрим качественную сторону этого явления.

При движении поршня в сжимаемой среде он испытывает дополнительное сопротивление, связанное с влиянием стенок: $X = X_a + X_{\text{доп}}$, где X – полное сопротивление, X_a – аэродинамическое и вязкое сопротивление среды, $X_{\text{доп}}$ – дополнительное сопротивление, вызванное влиянием стенок трубы.

Если $d/D \sim 1$, то чтобы $X_{\text{доп}}$ было минимальным, существуют два решения для получения оптимальной скорости поршня: поршень движется со скоростью, много меньшей скорости звука в этой среде, и поршень движется со сверхзвуковой скоростью. В первом случае среда плавно обтекает поршень. Во втором случае возмущения от движения поршня не распространяются вперед по потоку. При промежуточных же значениях скорости вклад дополнительного сопротивления весьма весом: поршень вынужден «проталкивать» большую часть сжимаемой среды перед собой по принципу шприца. Это явление можно наблюдать, например, в метро: когда на станцию прибывает поезд, то сначала из тоннеля дует весьма продолжительный и интенсивный ветер.

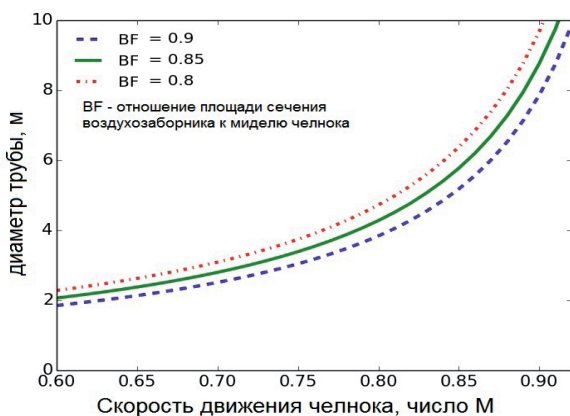


Рис. 8. Зависимость числа M , достижимого челноком, от диаметра трубы, в которой он движется (предварительные расчёты [6]).

Если же $d/D \ll 1$ (в пределе $D \rightarrow \infty$), то влияние стенок на поршень практически нулевое и наблюдается обычное обтекание тела средой.

Очевидно, что для рассматриваемого нами случая $d/D < 1$ существует промежуточное условное соотношение d/D , разделяющее обтекания по принципу «влияние стенок есть» и «влияние стенок практически отсутствует». В [1] указывают, что это промежуточное значение может быть получено из теоретических работ Артура Кэнтровица (Arthur Kantrowitz). Для Hyperloop $d/D \approx 0,6$ при давлении в трубе 100 Па.

Это соотношение диаметров следует соблюсти, чтобы минимизировать действие сжимаемости и сил трения, которые возникают при взаимодействии стенок трека и челнока, даже несмотря на форвакуум.

В [6] ссылаются на собственные расчёты, которые показывают, что для реальных воздухозаборников, где требуется замедление воздуха перед компрессором, диаметр трубы должен быть увеличен как минимум до 4 м при условии достижимости челноком скорости, соответствующей числу Маха $M = 0,8$ (~ 1000 км/ч, рис. 8).

Приведённые расчёты НАСА строятся на предположении, что воздухозаборник построен по принципу диффузора, а компрессор является осевым, поэтому необходимо замедление потока воздуха перед его первой ступенью. Это связано с тем, что существующие осевые компрессоры в силу конструктивных и прочих требований имеют ограничение по числу M входящего потока $M < 0,75$. В то же время компрессоры другого типа (например, центробежные)

способны устойчиво работать при больших числах M входящего потока. Более того, стоит вопрос, возможно ли создание принципиально новых компрессоров, рассчитанных на узкоспециализированные условия в Hyperloop (рис. 9).

Таким образом, для ответа на вопрос, какое соотношение d/D необходимо выбрать, и какова зависимость достижимого M от диаметра D , требуются дополнительные, в том числе экспериментально-конструкторские исследования. Без этого усредненная скорость челноков окажется ещё ниже, чем 750 км/ч.

4) Устойчивость парения челнока.

Наиболее сложной технической проблемой, которую предстоит решить при создании Hyperloop, представляется устойчивость парения челнока.

Характеристики челнока, приводимые в [1] и других источниках, рассчитаны в предположении, что челнок движется прямолинейно над плоской поверхностью, причем его вес равномерно распределен по всем 28 опорам.

Рассмотрим реальный случай движения челнока, а именно, движение по искривленной траектории. Это может быть спуск, подъём, поворот трубопровода или естественное искривление труб под действием собственного веса, вследствие термического расширения, проседания грунта под бетонными опорами, усталостного разрушения или деформации бетонных опор и креплений труб к этим опорам от многократного воздействия 15-тонной ударной нагрузки при прохождении челнока, колебаний трубы и прочих причин.

Пусть рассматриваемый участок — подъём челнока (или прогиб трубы вниз).



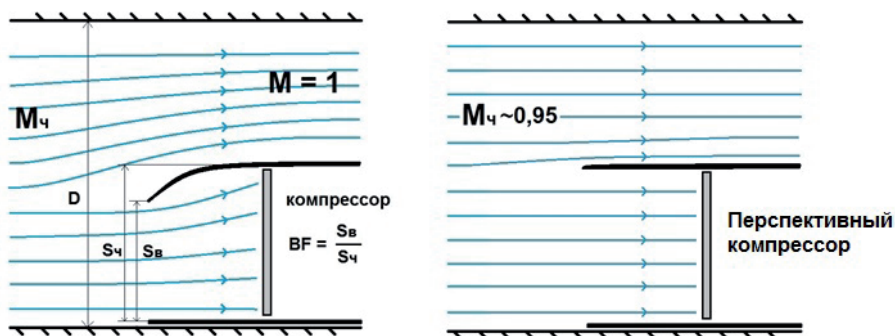


Рис. 9. Адаптация Hyperloop существующих осевых компрессоров и потребный перспективный компрессор.

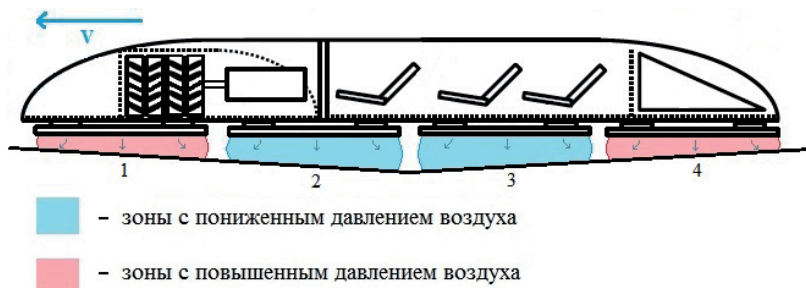


Рис. 10. Формирование воздушных подушек при движении челнока по криволинейной траектории (пример № 1).

Для простоты будем считать, что опор — 4 штуки. При движении челнока, независимо от того, является изгиб трубы плавным или ступенчатым, как на рис. 10, происходит перераспределение давлений воздуха под опорами.

Не вдаваясь в сложные уравнения движения челнока, поясним качественную сторону явления. Челнок преодолел прямолинейный участок, и ему необходимо начать смещение вверх. Для придания челноку вертикального ускорения должно произойти повышение давления в воздушных подушках вследствие сжатия воздуха, в показанном примере — под опорами 1 и 4. Это сжатие происходит из-за уменьшения толщины зазора между трубой и опорой. Одновременно зазор между опорами 2–3 и стенкой увеличивается, и давление газа под ними уменьшается.

То есть в определенный момент наблюдается следующая картина: давление под опорами 1 и 4 повышается и блокирует поступление сжатого воздуха из баллона под эти опоры, одновременно с этим давление под опорами 2 и 3 понижается.

Другими словами, при прохождении криволинейного участка «удерживающи-

ми» становится только часть опор, в которых блокируется дальнейшее образование воздушной подушки, в то время как оставшиеся опоры теряют удерживающие свойства.

Если в течение последующих 0,005 секунды (время преодоления воздушной опорой расстояния, равного её длине) кривизна траектории не исчезает — челнок попросту «съезжает» с поддерживающих его воздушных подушек 1 и 4 и задевает опорой 1 стенку трубы.

Оценка величины вертикального смещения для крайних опор, при котором для них блокируется поступление сжатого воздуха, дает 0,3 мм, или ~30 % от средней величины высоты парения 0,9 мм. Для челнока длиной 30 м это соответствует допустимому смещению трека 1 мм на 100 м пути, или смещению траектории на 0,011° (по-другому, радиус кривизны траектории — порядка 150 км).

Аналогичную картину можно видеть при изгибе трубы вверх (рис. 11).

Возможно ли создание трека с прочностными характеристиками, которые могли бы обеспечить соблюдение этих требований к траектории?

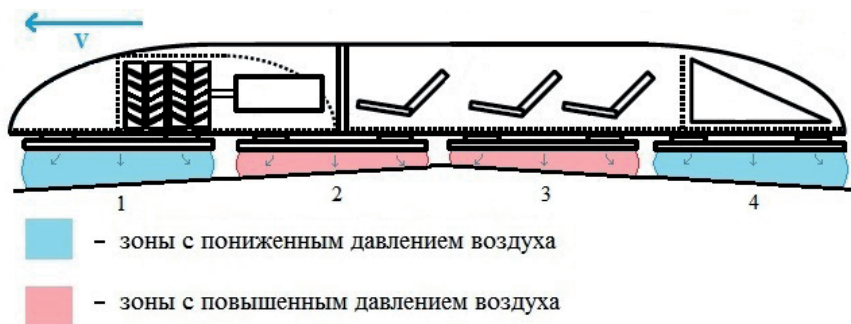


Рис. 11. Формирование воздушных подушек при движения челнока по криволинейной траектории (пример № 2).

Рассмотрим в качестве иллюстрации две вероятные причины искривления трека.

Первая причина. Рассчитаем величину максимального прогиба y_{max} стальной трубы длиной $L = 30$ м (эта величина соответствует шагу установки бетонных опор) и толщиной стенок 2 см, лежащей на двух опорах [7]:

$$y_{max} = -\frac{5}{384} \frac{qL^4}{EJ},$$

где $q \approx 10,5$ кг/см – распределенная нагрузка при прохождении челнока;

$E \approx 2,1 \cdot 10^6$ кг/кв. см – модуль упругости стали;

$$J = \frac{\pi}{64} (D_{\text{внеш}}^4 - D_{\text{внутр}}^4) - \text{момент инерции}$$

трубы, где

$D_{\text{внеш}}$, $D_{\text{внутр}}$ – внешний и внутренний диаметры трубы соответственно.

После подстановки этих численных значений получаем $y_{max} = 1,2$ см, что в 40 раз превышает допустимое значение отклонения траектории – треки требуют многократного усиления.

Вторая причина. Кратковременные периодические и вместе с тем достаточно сильные вертикальные воздействия на бетонные опоры, возникающие при прохождении 15-тонного челнока, будут приводить к постепенной трамбовке грунта под ними, причем неодинаковой в силу неоднородности грунта. В ряде случаев проседание будет ещё и трудно выявить (ситуация сравнима с прогибом рельсов под движущимся поездом: в состоянии покоя рельсы прямые, а при прохождении поезда – изгибаются). Чтобы избежать негативные последствия этого фактора, потребуется большее резервное усиление трубы.

Если же учесть другой фактор, влияющий на эксплуатацию транспорта, – расширение тел при нагревании, то получим следующее. Коэффициент линейного расширения бетона составляет $0,00001$ м/(м•К). При дневном колебании температуры в 10°C и высоте бетонной опоры более 10 м это дает ежесуточное изменение её высоты, а значит, и перепад высоты траектории в 1 мм.

Следовательно, для прокладки трассы Hyperloop нужно предусматривать гораздо более сложные инженерные сооружения, которые могли бы в автоматическом режиме обеспечивать отклонение траектории трассы на величины не более 1 мм/100 м пути в любое время суток любого времени года.

Как сказано выше, последняя из этих проблем является критической для системы в целом, поскольку увеличение высоты парения физически невозможно из-за ограничения по числу Рейнольдса. Следовательно, требуется отдельное исследование самой возможности автоматического управления (САУ) челноком при движении по криволинейной траектории. В отчёте Илона Маска о создании подобной системы, равно как и необходимости её существования, упоминаний нет.

На данном этапе проработки Hyperloop можно лишь сформулировать основные требования, которым должна удовлетворять эта САУ:

– точность измерения положения челнока в вертикальной плоскости – не более 0,2 мм;

– быстродействие измерения и подачи управляющих воздействий на органы управления – не более 0,005 с.



Возможными органами управления челноком могут быть дополнительные воздушные опоры, способные к кратковременному разовому повышению давления под ними. Для этого избыток воздуха после компрессора (0,29 кг/с) следует сжимать существенно больше, чем до 11000 Па, и собирать в отдельный баллон. Требования к кривизне траектории при этом не исчезнут, а будут только уменьшаться пропорционально степени сжатия дополнительного воздуха.

Другим способом решения проблемы могла бы стать магнитная левитация, использующаяся в поездах на магнитной подушке (маглевы). Но тогда проект Hyperloop перерождается, по сути, в тот же самый маглев, но переусложненный наличием труб и всего, что связано с обеспечением форвакуума в этих трубах, хотя и дающий выигрыш в затратах энергии на движение челноков. Скорость современных поездов на магнитной подушке далека от 1000 км/ч в том числе по причине удержания поезда на траектории. И если стоимость строительства трассы маглева доходит до 100 млн USD/км, то какова будет стоимость маглева в вакуумной трубе, и насколько правдоподобна будет экономика проекта (согласно рис. 1) — вопрос, требующий отдельного исследования.

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ проекта Hyperloop обрисовывает круг технических проблем, которые необходимо решить до начала строительства полноценной транспортной системы. Это:

- создание надёжных быстродействующих шлюзов в местах прохождения челнока со станции в трек и обратно;
- проверка способности комплекса вакуумных насосов эффективно бороться с утечками воздуха и поддерживать рабочее давление 100 Па в объекте общей ёмкостью более 2 куб. км;
- исследование устойчивости поддерживающей воздушной подушки в условиях форвакуума и с учётом высокой скорости движения;

— получение экспериментальной базы с целью расчётов критического числа Рейнольдса для объёмно-симметричных течений с конфигурацией, соответствующей форме удерживающей струи;

— создание надёжной автономной системы охлаждения с учётом требования её перезарядки на станции за минимально возможное время;

— адаптация существующих или разработка компрессоров нового типа, способных устойчиво работать при числах M входящего потока не менее 0,95;

— изучение усталостных прочностных характеристик стальной трубы и поддерживающих опор в условиях кратковременного интенсивного периодического нагружения их массой порядка 15 тонн;

— подтверждение устойчивости парения челнока, опирающегося на воздушную подушку, при движении по криволинейной траектории и в условиях естественного изгибания трубы.

Без решения этих задач вопрос реализуемости проекта Hyperloop с заявленными технико-экономическими характеристиками останется открытым.

ЛИТЕРАТУРА

1. Отчёт «Hyperloop Preliminary Design Study Technical Section». [Электронный ресурс]: http://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha-20130812.pdf. <http://teslamotors.com/> Доступ 06.02.2017.
2. Дзензерский В. А., Омеляненко В. И., Васильев С. В., Матин В. И., Сергеев С. А. Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией. — Харьков: Изд-во Харьковского политехнического института, 2001. — 481 с.
3. Ежи Бень. Модели и любительские суда на воздушной подушке. — Ленинград: Судостроение, 1983. — 128 с.
4. Вопросы проектирования малых судов на воздушной подушке // Катера и яхты. — 1965. — № 4. [Электронный ресурс]: http://www.barque.ru/shipbuilding/1965/design_considerations_small_hovercraft/. Доступ 06.02.2017.
5. Федяевский К. К., Войткунский Я. И., Фадеев Ю. И. Гидромеханика. — Ленинград: Судостроение, 1968. — 568 с.
6. Jeffrey C. Chin, Justin S. Gray, Scott M. Jones, Jeffrey J. Berton. «Open-source conceptual sizing models for the Hyperloop Passenger Pod». NASA Glenn Research Center, Cleveland, OH, 2015. — P. 18.
7. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов. — Киев: Наукова думка, 1975. — 704 с. ●

Координаты авторов: **Смирнов А. В.** — smirnov@tsagi.ru, **Егошин С. Ф.** — sergey4791@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 06.02.2017, принята к публикации 15.03.2017.