

DOI:

СТРУКТУРА ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ HYPERLOOP С БОКОВЫМИ ОТВЕТВЛЕНИЯМИ

Дудников Е.Е

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Россия, г. Москва ул.

Профсоюзная д.65

e_dudnik@ipu.ru

Аннотация: В первой части доклада мы представляем краткий анализ работ по развитию новой транспортной технологии Hyperloop за последние годы. Далее мы рассматриваем структуру расширенной транспортной системы Hyperloop, когда главная магистраль имеет боковые ответвления. Для сохранения скоростных возможностей системы мы разделяем используемые пассажирские капсулы на экспресс-капсулы и локал-капсулы. Экспресс-капсулы используют только главную магистраль, по которой проходят без остановок на максимально возможной скорости. Обслуживание боковых ответвлений и возможных промежуточных остановок поручается локал-капсулам. Эти капсулы передвигаются между ответвлениями с использованием главной магистрали.

Ключевые слова: технология Hyperloop, пассажирские системы Hyperloop, структура Hyperloop систем.

Введение

Начало работ по развитию транспортных систем Hyperloop связывают с появлением в августе 2013 г доклада известного американского инженера, изобретателя и бизнесмена Илона Маска, посвященного описанию проекта новой сверхскоростной трубопроводной транспортной магистрали между двумя крупными американскими городами Лос-Анджелесом и Сан-Франциско [1]. Сам Маск первоначально не предполагал заниматься этим проектом. По его инициативе в США были организованы две фирмы, не связанные с ним финансово, которые занялись развитием технологии Hyperloop путем разработки конкурентных проектов. Это фирма Hyperloop Transportation Technologies Inc. (НТТ) и Hyperloop Technologies Inc., которая позже изменила свое название на Virgin Hyperloop One. Финансирование этих фирм осуществлялось за счет частных финансовых фондов. Позже к ним присоединилась известная в области космических разработок фирма SpaceX, принадлежащая Илону Маску, со своей собственной программой в области Hyperloop. Эти три фирмы продолжают оставаться ведущими в области разработки технологии Hyperloop, и в настоящее время по их работам можно представить себе положение в этой важной отрасли. С момента появления доклада Маска в 2013 г прошло уже семь лет, но ни одной из фирм не удалось построить реально работающую систему Hyperloop.

Наиболее близка к успеху была фирма НТТ. Эта фирма имеет предварительные соглашения с рядом заказчиков в Центральной Европе и в Азии на разработку проектов пассажирских магистралей Hyperloop. Но наиболее реальными для внедрения считаются два проекта. Это трасса длиной 10 км между аэропортом Аль-Мактаме и местом проведения выставки Экспо-2020 в Дубае (Объединенные Арабские Эмираты -- ОАЭ) и похожая трасса между городом Тунжань (Китай) и местным аэропортом. Для реализации последнего проекта НТТ учредила совместное предприятие с муниципалитетом китайского города. Предварительно широко рекламировалось открытие трассы в ОАЭ в 2020 г. Но на Всемирном экономическом форуме в Давосе в 2019 г глава фирмы НТТ Дирк Алборн обещал запустить коммерческую эксплуатацию Hyperloop в ОАЭ в 2022 г. Будет ли этот новый срок выдержан мы узнаем в будущем. Для магистрали в ОАЭ фирма НТТ с помощью известной испанской фирмы Carbures подготовила новую пассажирскую капсулу, отличную от той, которая предлагалась в [1] Маском. Капсула имеет длину 98,5 футов (около 30 м), поперечное сечение 9 футов (2,7 м), вес 20 тонн и вместимость 40 человек. Капсулу должны были перевезти во Францию и испытывать на новой трассе совместного научно-исследовательского центра по проблемам Hyperloop в Тулузе. О китайском проекте фирмы НТТ, сроках его реализации нет достоверной информации.

Интересна история фирмы Virgin Hyperloop One. Эта фирма в апреле 2017 года завершила строительство своей экспериментальной трассы длиной 500 метров и диаметром трубы в 3,3 метра. В трубе поддерживается давление в 100 Паскалей. Трасса расположена в пустыне Невада рядом с городом Лас-Вегас (США) и получила название DevLoop. Через месяц на трассе начались испытания капсулы, разработанной компанией.

В декабре 2017 года капсула разогналась до скорости 387 км/час, которая оказалась рекордной для этой трассы. Эксперты отметили, что можно было бы достигнуть существенно большей скорости, если

бы трасса была длиной 2000 метров. Видимо, задача построения подобной экспериментальной трассы должна была стать одной из актуальных плановых задач фирмы, но по этому вопросу нет информации.

В мае 2018 г компания объявила о том, что создала совместное предприятие с третьим по величине в мире портовым оператором DPWorld, которое будет называться DP World Cargospeed. Цель предприятия - применить технологию Hyperloop для построения грузовых транспортных систем морских портов, прежде всего, морского порта Джебель-Али в эмирате Дубай (ОАЭ).

Если подобные системы окажутся эффективными, DP World готова внедрить их на большинстве из своих 77 грузовых терминалов, расположенных в более чем 40 странах мира. Разработка этой задачи стала особо реальной в связи с тем, что после ряда преобразований в руководстве компания Virgin Hyperloop One президентом компании стал президент DP World Султан Ахмед бен Сулайем.

В 2018 г в Индии появилась идея строительства высокоскоростной трассы, соединяющей столицу штата Махараштра город Мумбай и город Пуну, второй по величине город региона. Меморандум о взаимопонимании между правительством штата и компанией Hyperloop One был подписан в 2018 году. Предполагалось, что Hyperloop свяжет Мумбай и Пуну и позволит преодолевать 180-километровое расстояние между двумя городами всего за 20 минут. Для крайне людного (127 миллионов) и самого индустриально развитого в Индии штата, суперскоростная система транспортной связи стала бы большим подспорьем в борьбе с негативными эффектами перенаселения. Озвучивался и порядок сумм строительства: десять миллиардов долларов.

Но в январе 2020 г власти индийского штата Махараштра решили приостановить участие в реализации проекта сверхскоростной магистрали Hyperloop. Об этом заявил изданию India Today заместитель главного министра штата Аджит Павар. “У нас нет возможности экспериментировать с Hyperloop. Мы сконцентрируемся на других видах транспорта. В то же время, если эта технология будет развиваться дальше с успешными испытаниями за рубежом, мы можем подумать об этом”, — пояснил чиновник.

Фирма SpaceX объявила о начале строительства своей испытательной трассы в начале сентября 2016 г. Формально строительство трассы было связано с международным конкурсом на дизайн пассажирской капсулы, объявленном SpaceX летом 2016 г. В конкурсе, названном Hyperloop pod competition, предполагалось участие студенческих команд ведущих технических университетов мира со своими моделями капсул Hyperloop с последующим испытанием этих капсул в гонке на экспериментальной трассе компании.

Международный конкурс продолжался вплоть до 2019 г, на трассе с «открытой» трубой диаметром 1,8 м и длиной в 1 милю (1600 м). Все капсулы использовали принцип движения на магнитной подушке. Последние два года ежегодные финальные соревнования выигрывала команда Мюнхенского технического университета. В июле 2019 г их капсула достигла на трассе абсолютно рекордной скорости в 463 км/час. Следует отметить, что на одном из этапов соревнований была представлена капсула, разработанная совместно специалистами фирм SpaceX и Tesla. Эта капсула показала лишь скорость 355 км/час, которая меньше рекордной. Присутствовавший на соревнованиях Илон Маск обещал, что к следующим соревнованиям летом 2020 г фирма SpaceX построит в районе расположения фирмы герметичную вакуумную подземную трассу длиной в 10 миль (16,1 км). Тоннель для трассы поручено было строить новой фирме Маска Boring Company, организованной в 2017 г.

Илон Маск создал данную фирму для разработки новых технологий строительства подземных туннелей. Этот интерес к туннелям был прямо связан с Hyperloop магистралями. Прокладывание Hyperloop магистралей в условиях городской застройки связано с громадными затратами и неэффективными маршрутными решениями. Использование подземного туннеля позволяет достаточно свободно выбирать маршрут магистрали, в частности, обеспечить его прямолинейность, а это позволяет достигнуть высоких скоростных характеристик на всех отрезках дороги.

К сожалению, в настоящее время использование существующих туннельных технологий связано с большими дополнительными материальными затратами и большими сроками выполнения строительных работ. Поэтому перед новой компанией Boring Company Маск поставил амбициозную задачу: в короткие сроки разработать такую технологию прокладки подземных туннелей, которая обеспечивала бы десятикратное увеличение производительности работ и десятикратное уменьшение стоимости строительства по сравнению с существующими методами.

Известно, что компания Boring Company в 2019 году закончила строительство туннеля Hyperloop, связывающего центр города Лос-Анжелес с международным аэропортом. Время в пути для пассажиров аэропорта составит 8 минут. В настоящее время Маск строит туннель протяженностью 10,3 мили (16,6 км), соединяющий пригород города Балтимора с местечком Ганновер в штате Мериленд на

атлантическом побережье США. Возможно, что этот туннель будет частью подземной магистрали Hyperloop между городами Вашингтоном и Нью-Йорком.

В связи с интересом, проявляемом к проектам Hyperloop, в последнее время появилось несколько научных публикаций, рассматривающих технико-экономические вопросы строительства и применения этих технологий.

В 2019 году Институт проблем естественных монополий (ИПЕМ) в Санкт-Петербурге опубликовал экспертное мнение об экономической целесообразности строительства линии Hyperloop между Москвой и Санкт-Петербургом длиной 650 км и о потенциальной стоимости билета для пассажиров на этой линии [2]. В работе рассматривалось несколько вариантов проекта, но мы приведем здесь результаты расчетов для двухтрубного исполнения линии.

Оценка капитальных затрат произведена экспертами на основе технико-экономического обоснования строительства линии Стокгольм-Хельсинки без учёта стоимости выкупа земли под линию. Вместимость капсул определена в 40 мест, минимальные интервалы между отправлениями соседних капсул Hyperloop - 6 минут, предельная скорость — 1102 км/час, полные перегрузки — не более 0,5g. Срок окупаемости принят равным 20 годам. Минимальная стоимость строительства составит 1,18 трлн. руб. (\$18 млрд.), что в расчёте на 1 км пути дороже строительства конвенциональной двухпутной ВСМ с эксплуатационной скоростью до 400 км/час.

Максимально реализуемый пассажиропоток составит 5,2 млн человек в год, что не превосходит перевозки Сапсаном.

Стоимость билета для поездки одного пассажира в одном направлении в ценах 2019 года может составить не менее 27,5 тыс. руб. (\$421). Стоимость проезда, выраженная в долларах в расчёте на 1 км пути (0,4-0,7\$/км), сопоставима с оценкой стоимости проезда на линии Хельсинки-Таллин (0,5 \$/км), но в 3 раза меньше стоимости проезда на линии Мумбай-Пуна (1,6 \$/км). Все эти оценки в 10-40 раз больше первоначальных оценок стоимости проезда для линии Лос-Анджелес—Сан-Франциско проекта Маска (0,04 \$/км).

Государственная поддержка проекта может позволить значительно сократить минимальную стоимость билета для пассажиров (на 41,4% до 16,1 тыс. рублей или \$247), однако не сделает цену доступной для массового пользователя, что ставит под сомнение перспективность бюджетного софинансирования.

Реальное сокращение времени путешествия с учётом передвижения по городу к станции Hyperloop составит от трёх до двух часов или сокращение времени не более, чем в 2-3 раза.

Для окупаемости проекта клиентом такой системы может быть лишь долларовый миллионер, причём от 2,4% до 7,6% всех долларовых миллионеров России должны пользоваться системой Hyperloop ежедневно. Обычная аудитория не сможет обеспечить пассажиропоток, необходимый для окупаемости проекта в обозримой перспективе.

В связи с этим, по мнению специалистов ИПЕМ, строительство системы Hyperloop между Москвой и Санкт-Петербургом с расчетом на доход от эксплуатации выглядит нецелесообразным, даже несмотря на значительную потребность в росте транспортного сообщения между двумя агломерациями.

1 Структурные исследования

В настоящее время в большинстве проектов пассажирских систем Hyperloop присутствуют простейшие структуры: магистрали, соединяющие две конечные станции без промежуточных остановок и ответвлений. Примером может служить главная магистраль между городами Лос-Анджелесом и Сан-Франциско проекта Hyperloop в Калифорнии (США), [1].

Главная магистраль системы на первом этапе не должна иметь боковых ответвлений, но на втором этапе структура системы усложняется и вводятся боковые ответвления: в районе Сан-Франциско появляется ветка на Сакраменто, в середине главной магистрали ветка на Фресно и в районе Лос-Анджелеса ветка на Лас-Вегас и ветка на Сан-Диего, см. Рис 1,[1].

Протяженность основной главной магистрали составляет 561 км. Каждые пять минут с конечных станций отправляются капсулы. Согласно расчетам, пассажирская капсула должна проходить это расстояние за 2134 сек. (35 мин.), достигая на некоторых участках максимальной скорости в 1220 км/час. При расширении системы и появлении промежуточных остановок и ответвлений открываются возможности по представлению скоростного транспортного обслуживания для значительно большего числа граждан, однако при этом можно ожидать ухудшения основных показателей системы, связанных с её скоростными характеристиками.



Рис.1. Схема проекта системы Hyperloop в Калифорнии

Здесь может помочь выбор надлежащей структуры системы и алгоритмов управления этой структурой. В данной работе рассматриваются структуры системы Hyperloop, которые при расширении системы позволяют сохранить скоростные возможности системы. Основой исследований служит принцип разделения используемых пассажирских капсул на два функциональных класса: экспресс-капсулы и так называемые локал-капсулы. Экспресс-капсулы используют только главную магистраль, по которой проходят без остановок и задержек на максимально возможной скорости. Обслуживание боковых ответвлений и остановок поручается локал-капсулам. Эти капсулы передвигаются между остановками и ответвлениями с использованием главных магистралей. Требуется, чтобы они не мешали движению экспресс-капсул по главным магистралям. Оба вида капсул последовательно стартуют с конечных станций через равные промежутки времени t_s . Пусть i -ая локал-капсула стартует между $(i+1)$ -ой и $(i-1)$ -ой: экспресс-капсулой. Она начинает движение, ускоряется и проходит функциональную траекторию, которую до неё прошла $(i-1)$ -ая экспресс-капсула, а за ней повторит $(i+1)$ -ая экспресс-капсула. Это движение будет продолжаться до момента t_{ij} , когда i -ая локал-капсула начнет тормозить, чтобы остановиться на j -ой остановке в момент t_{j0} . Продолжительность торможения составит величину $h_{ij}=(t_{j0}-t_{ij})$. За время торможения временной интервал между i -ой локал-капсулой и следующей за ней $(i+1)$ -ой экспресс-капсулой уменьшился на величину $h^*_{ij}=(t_s-h_{ij})$. Эта величина является очень важной. Дело в том, что разработчики системы стараются выбрать в качестве значения t_s по возможности малую величину. Чем меньше эта величина, тем больше капсул стартует в единицу времени, а следовательно, больше перевозится пассажиров и растут технико-экономические показатели системы. Однако при этом уменьшается величина временного интервала между тормозящей капсулой и капсулой, следующей за ней на большой скорости, что снижает уровень безопасности работы системы. Для расчета параметров системы нужно знать оценки продолжительности торможения на всех остановках системы.

Рассмотрим, как в системе Hyperloop реализуется движение капсул. Для этого используются специальные линейные электрические двигатели, которые могут ускорять и замедлять движение. Имеется два вида элементов с электрическими двигателями: элементы, ускоряющие или замедляющие движение капсул в диапазоне скоростей от 0 до 480 км/час, и элементы с более мощными двигателями для диапазона скоростей от 480 до 1220 км/час. Неподвижная часть двигателя (статор) монтируется на нижней внутренней части трубы и имеет протяженность в 4 км. Подвижная часть двигателя (ротор) расположена в капсуле в виде металлического листа размером 1500x45x5 см. При включении тока, между статором и ротором двигателя возникает электромагнитное поле, которое выталкивает в зависимости от направления тока в обмотке статора капсулу с ротором вперед, если нужно ускорить движение, или назад, если нужно затормозить движение капсулы.

На величину ускорения (замедления) капсул накладывается ограничение, связанное с человеческим фактором. Величина ускорения не может превышать половину величины ускорения свободного падения g ($g = 9,81 \text{ м/сек}^2$), т.е. $4,9 \text{ м/сек}^2$. Известно, что нормальный человек легко переносит ускорение величиной $\frac{1}{2} g$, поэтому данное ограничение обеспечивает условие комфортности перевозки пассажиров.

Таким образом, капсула стартует с использованием линейных двигателей, работающих в режиме ускорения. До момента достижения скорости в 100 км/час капсула использует колесную систему. Затем колеса убираются, как у самолета, и дальше движение капсулы происходит на воздушной или магнитной подушке. При торможении капсула использует двигатели, работающие на торможение до скорости 100 км/час . Далее выпускаются колеса, и капсула продолжает движение на колесах до полной остановки. Здесь можно дать оценку продолжительности торможения. Допустим, что капсула тормозит с начальной скоростью 1220 км/час и замедлением $4,9 \text{ м/сек}^2$. Выразим скорость 1220 км/час в других физических единицах как 339 м/сек . Разделим скорость на величину замедления. Получим оценку времени торможения капсулы до остановки – 69 сек . Это приблизительная оценка, мы не учитываем здесь ряд важных обстоятельств, например, уменьшение линейной скорости капсулы при торможении. Улучшение оценки дает еще большую величину времени торможения.

В [1] старты последовательности капсул определены как одна капсула в 5 минут . Уменьшение временного интервала между соседними капсулами больше чем на минуту не позволяет осуществить торможение и остановку впереди идущей капсулы на главной магистрали. Проблему можно решить, если увеличить интервал между стартами капсул системы с 5 минут до $8-10 \text{ минут}$ и более. Но как мы выше указывали, это приведет к серьёзным ухудшениям технико-экономических показателей системы. В докладе мы предлагаем другое решение.

Перейдем теперь к изложению вариантов решения исходной задачи построения структуры транспортной пассажирской системы Hyperloop с боковыми ответвлениями.

Рассмотрим первую достаточно простую схему. Введем на главных линиях в местах ответвлений остановки. На каждом ответвлении введем начальную и конечную остановку. Отделим ответвления от главных линий. Таким образом, экспресс-капсулы двигаются по главным линиям без остановки, локал-капсулы останавливаются на остановках при главных линиях. А между остановками эти капсулы передвигаются по главным линиям. По линиям ответвлений между начальными и конечными точками передвигаются свои независимые капсулы.

Рассмотрим локал-капсулу, которая после старта движется по главной линии и должна остановиться на промежуточной остановке. Введем дополнительную линию, которая начинается в точке начала торможения капсулы и идет вдоль главной линии до остановки. Мы рассматриваем тот случай, когда локал-капсула не может после начала торможения оставаться на главной линии, так как в процессе торможения интервал между ней и следующей за ней капсулой станет меньше допустимого.

В начале торможения локал-капсула переходит на эту линию, освобождая главную линию для капсул, которые не останавливаются, тормозит на этой дополнительной линии и останавливается. Будем называть эту линию линией торможения. Если после остановки ей надо продолжить движение по прямой главной линии, локал-капсула использует продолжение дополнительной линии вдоль главной линии для разгона и, достигнув нужной скорости, переходит на главную линию, встраиваясь в поток капсул, двигающихся без остановки в прямом направлении. Будем называть эту линию линией разгона. Аналогичные дополнительные линии строятся вдоль обратной главной линии.

Если капсуле не нужно двигаться после остановки в прямом направлении, то её переводят на дополнительную линию вдоль обратного направления, загружают пассажирами, и она разгоняется по этой линии в обратном направлении. При данной структуре обеспечивается возможность для отдельных капсул осуществить остановку на промежуточной станции, не мешая другим капсулам пройти весь маршрут без остановки или сильного торможения.

Используя подход, разработанный в [3] для представления элементов структуры транспортных систем, выделим элемент данной структуры, содержащий одну остановку при главной магистрали и соответствующего ей ответвления, см. Рис.2.

На Рис.2 главная магистраль изображена в виде двух сплошных линий, параллельных нижнему обрезу рисунка. По верхней линии капсулы передвигаются слева направо, по нижней линии капсулы передвигаются в обратном направлении.

Магистраль бокового ответвления представлена аналогичными двумя линиями сверху рисунка. Эти линии перпендикулярны главным линиям. На конце линий ответвления показана конечная остановка. Для обозначения остановки использована окружность малого диаметра. По правой линии капсулы приходят на остановку, по левой покидают её.

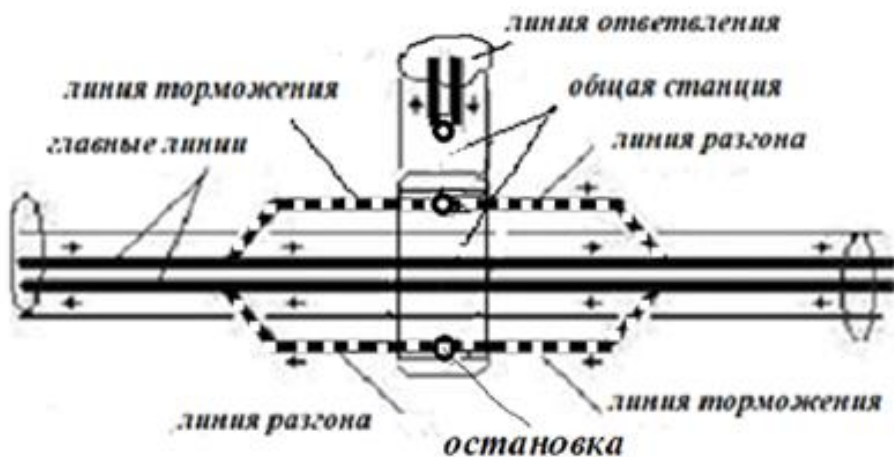


Рис.2. Схема элемента системы при наличии ответвления с остановкой

Магистраль бокового ответвления представлена аналогичными двумя линиями сверху рисунка. Эти линии перпендикулярны главным линиям. На конце линий ответвления показана конечная остановка. Для обозначения остановки использована окружность малого диаметра. По правой линии капсулы приходят на остановку, по левой покидают её.

От верхней главной линии отходит вспомогательная линия для торможения локал-капсул, останавливающихся на данной остановке. Эта линия торможения, как и все другие вспомогательные транспортные линии показана на рисунке пунктирной линией. По этой линии локал-капсулы приходят на свою остановку.

Если эта остановка для данной локал-капсулы является конечной, то после выгрузки пассажиров она переводится на локальную остановку в обратном направлении, принимает новых пассажиров и отправляется по линии разгона для выхода на соответствующую главную линию.

Если локал-капсула должна следовать по прямому маршруту, то после остановки она переходит на линию разгона и следует по ней до выхода на главную линию в прямом направлении. Аналогичные процедуры предусмотрены для локал-капсул, следующих по главной линии в обратном направлении.

Остановки главной линии и остановка бокового ответвления могут быть пространственно разобщены. В этом случае пассажиры, прибывающие на конечную остановку бокового ответвления и намеревающиеся продолжить поездку с использованием главной линии, покидают остановку и пешком или с помощью местных транспортных средств добираются до необходимой остановки главной дороги. Там они садятся в соответствующую локал-капсулу и продолжают поездку.

Капсулы, работающие на боковых линиях, не зависят от экспресса-капсул и локал-капсул основной линии. Поэтому они могут ходить по собственному расписанию с максимальной скоростью и со своей частотой стартов на конечных остановках. Конечно, для удобства пассажиров расписание боковых капсул нужно согласовывать с расписанием локал-капсул главной линии.

В предложенном выше первом варианте структуры линии боковых ответвлений не связаны с остановками главных линий. Теперь естественно рассмотреть второй вариант структуры, когда мы объединяем все остановки Рис.2 в одну комплексную остановку. В этих обстоятельствах можно организовать перемещение капсул с пассажирами между остановками ответвления и остановками главных линий. Допустим, что на конечную остановку линии ответвления, которая теперь вошла в состав единой остановки, прибывает капсула, где половина пассажиров имеет билеты до этой остановки, а другая половина имеет билеты до остановок, лежащих на главной линии прямого направления справа от нашей станции. Остановки, лежащие справа от нашей станции, достигаются по главной линии прямого направления, а лежащие слева – по обратной главной линии. Поэтому половина пассажиров этой капсулы сойдет на общей остановке, а другая половина доедет в капсуле до прямой главной линии справа и далее через линию разгона проследует по этой главной линии до своих остановок.

Когда очередная локал-капсула должна следовать вперед по линии разгона, чтобы занять место на главной линии, ей должен быть выделен свободный временной интервал для безопасного встраивания в цепь капсул, двигающихся по этой главной линии. Это очень важная и ответственная операция. Для каждой локал-капсулы, подходящей к линии разгона, диспетчерская служба рассчитывает время старта

капсулы и её скорость для того, чтобы она попала в нужный интервал встраивания и имела при этом нужную скорость. Интервалы встраивания образуются, когда локал-капсулы при торможении перед очередной остановкой покидают главную линию и их место остается свободным. Можно также образовывать подобные интервалы путем задержки старта очередной капсулы в конечных пунктах магистрали.

Рассмотрим теперь третий важный вариант структуры системы, когда на месте ответвления не планируется остановка. В этом случае боковые и главные линии непосредственно соединяются друг с другом, как это показано на Рис.3.

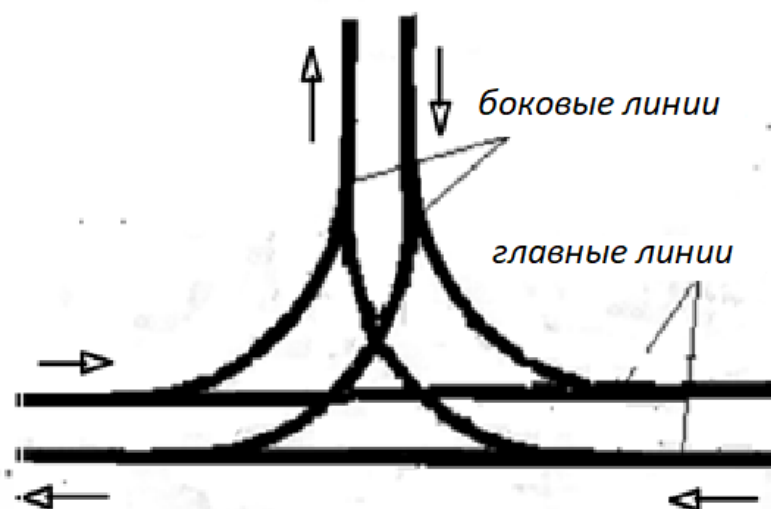


Рис.3. Схема элемента системы с ответвлением без остановки

Капсула, следующая из начальной точки ответвления в конечную точку главной линии, после движения по правой боковой линии переходит на главную линию прямого направления и дальше следует по ней. Эта же капсула, направляемая в начальную точку главной линии, после движения по правой боковой линии переходит на главную обратную линию и дальше следует по ней. Соответственно, капсула, следующая из начальной точки главной линии в начальную точку ответвления, после движения по главной линии прямого направления переходит на левую боковую линию и дальше следует по ней. Капсула, следующая из конечной точки главной линии в начальную точку ответвления, после движения по главной обратной линии переходит на левую боковую линию и дальше следует по ней.

Соединение соответствующих боковых и главных линий происходит по круговым линиям. Причем, соединяющиеся прямые линии являются касательными к окружностям, соответствующим этим круговым линиям. При прохождении этих криволинейных маршрутов капсулы и находящиеся в них пассажиры подвергаются воздействию центробежной силы. Возникает центробежное ускорение. Величина этого ускорения не должна превышать величины $0,5 g = 4,9 \text{ м/сек}^2$. При такой величине ускорения пассажиры будут чувствовать себя комфортно. Для каждой скорости капсулы можно рассчитать радиус «закругления» маршрута. Для скорости 1220 км/час радиус окружности сопряжения должен быть не меньше величине 23,5 км, см. [1]. Сложность реализации и управления этой схемой связана с тем, что достаточно трудно синхронизировать момент подхода капсулы, следующей с боковой линии на главную, с допустимым интервалом её встраивания в движение на главной линии.

Переход с боковых линий на главные и обратно без остановки позволяет в расширенной системе ввести кроме исходной магистрали от Сан-Франциско до Лос-Анжелеса дополнительные магистрали:

Сан-Франциско -- Лас-Вегас, Сан-Франциско -- Сан-Диего, Лос-Анжелеса -- Лас-Вегас, Лос-Анжелеса -- Сан-Диего. По этим магистралям без остановок будут ходить экспресс-капсулы, развивая максимальную скорость.

Литература

1. Hyperloop Alpha (pdf). SpaceX (12 August 2013). The first concept of the system proposed by
2. Elon Musk on August 12, 2013
3. ИИЕМ. Hyperloop Москва-Санкт-Петербург: сколько может стоить проект для инвестора и пассажира?. Экспертное мнение Института проблем естественных монополий (5 июля 2019)

4. *Dudnikov E*, Structure of Hyperloop systems with intermediate station \Proceedings of the 12 International Conference "Management of Large-Scale System Development" (MLSD) M.:2019