

Скоростной эстакадно-трубопроводный аэропоезд на воздушной подушке

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»*

Рассмотрены трубопроводные и эстакадные бесконтактные транспортные средства со сверхзвуковой и дозвуковой скоростями движения как в вакууме, так и вне его. Чтобы исключить аварийные ситуации, связанные с вакуумом, предложена аэродинамическая компоновка аэропоезда на воздушной подушке, движущегося над эстакадой с арочным укрытием большого поперечного сечения. Предложение направлено на достижение достаточно больших скоростей движения (500 км/ч) при всепогодной и безопасной эксплуатации. Изложены методики расчета технических параметров такого транспорта. Рассчитаны параметры для конкретного примера.

Ключевые слова: транспорт, дозвуковой аэропоезд, воздушная подушка, баллонное ограждение, эстакада, арочное укрытие, методики расчетов, энергетические затраты, большая скорость, всепогодность, трасса.

Введение

Повышение скорости доставки пассажиров и грузов имеет большое значение в развитии народного хозяйства любой страны, а особенно при кооперации между ними. В соответствии с требованиями научно-технического прогресса необходимо постоянное совершенствование производства, создание и внедрение прогрессивной техники и технологий. Важную роль в этих процессах играет транспорт. Ясно, что с ростом объемов производства повышается нагрузка на транспорт и увеличиваются транспортные расходы. Поэтому совершенствование существующего и создание новых скоростных видов транспорта является актуальной задачей.

Современный наземный колесный транспорт имеет верхний предел скорости движения. Очевидное решение состоит в том, чтобы избавиться от колес, т. е. исключить их контакт с дорожным полотном. Поэтому инженеры почти столетие предпринимают попытку создать скоростной бесконтактный транспорт, движущийся (парящий) в нескольких сантиметрах над дорожным полотном.

Трубопроводный транспорт со сверхзвуковой скоростью движения

Концепция такого вида транспорта изложена в работах [1, 2, 3, 4]. Ее суть состоит в том, что герметичные капсулы на магнитной подвеске (магнитной левитации) летят внутри трубы, из которой откачен воздух. Тягу и торможение осуществляет линейный электрический двигатель, представляющий собой развертку статора (первичная обмотка) и ротора (вторичная обмотка) стандартного роторного электродвигателя. Скорость движения регулируется изменением частоты питающего тока.

Скорость движения капсулы в вакуумной трубе может достигать значения порядка 5600 км/ч, т. е. превышают скорость звука в 4,5 раза.

Однако для реализации такого транспорта необходимо гарантировать вакуум в многокилометровой трубе, условия жизнеобеспечения пассажиров в герметичной капсуле. Любая трещина в капсуле и любой контакт с трубой

мгновенно приведут к катастрофе. Для подвески капсулы, например, в работе [5] предлагается использовать пассивную магнитную левитацию. В этом случае специальные постоянные магниты (со специальным химическим составом) устанавливают на капсуле по так называемой схеме Халбаха (Halbach array). При движении этих магнитов с капсулой относительно проводящих элементов (пассивных короткозамкнутых катушек), расположенных на трубопроводе, возникает электромагнитное поле с большой подъемной силой. На малой скорости она исчезает. Но такая система опробована лишь в лабораторных условиях. Примеров их применения в опытных и промышленных образцах нет. А обычная классическая пассивная магнитная левитация является неустойчивой системой. Поэтому требуется автоматическая система стабилизации подъемной силы.

Примерно по такой схеме будет работать получившая широкое обсуждение трубопроводная транспортная система Hyperloop, предложенная известным американским бизнесменом - новатором Elon Musk [5]. Отличие состоит лишь в том, что будет использоваться не полный вакуум, а так называемый "форвакуум" с давлением, составляющим примерно 1/1000 от атмосферного. При этом расчетная скорость составит 1200 км/ч.

Ясно, что реализацией таких проектов могут заниматься только те фирмы, которые обладают самыми передовыми технологиями и гарантируют надежность эксплуатации таких систем. Ясно также, что нужно их сначала опробовать в качестве грузового транспорта (без пассажиров).

Цель статьи – предложить дозвуковой трубопроводный транспорт со скоростью движения 500 км/ч без использования вакуума при исключении рисков разгерметизации, присущих системе Hyperloop и подобным ей транспортным системам.

Эстакадные и трубопроводные транспортные системы с дозвуковой скоростью движения

Бесконтактный эстакадный транспорт представляет собой систему, состоящую из аэропоезда на воздушной подушке (ВП), который движется над специальным направляющим полотном (эстакадой) в обычных атмосферных условиях.

К этому времени сложились две принципиальные концепции такого транспорта (рис. 1).

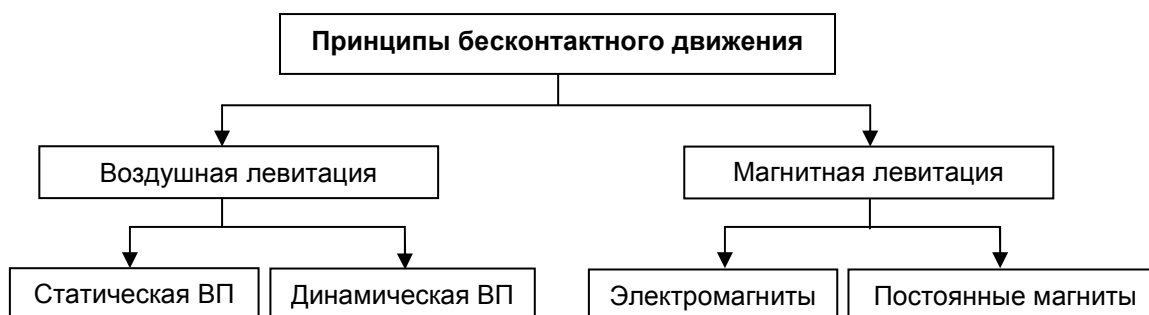


Рис.1. Принципы бесконтактного движения

По первой концепции используют принцип воздушной левитации с помощью ВП, которая, в свою очередь, разделяется на статическую ВП (работающую от нагнетателя) и динамическую ВП (использующую скоростной напор набегающего потока). По второй концепции применяют принцип магнитной подвески, которую можно разделить на активную электромагнитную левитацию и пассивную магнитную левитацию (парение). Естественно, можно использовать комбинацию всех этих принципов.

На малых скоростях движения для сокращения энергетических затрат целесообразно применять колесный режим движения.

Активная магнитная левитация (с использованием сверхпроводящих электромагнитов) является довольно дорогостоящей системой, а динамическая ВП для надежной эксплуатации требует разработки сложной автоматической системы управления. Для использования пассивной магнитной левитации необходимо применять дорогостоящие специальные постоянные магниты, а также автоматическую систему их стабилизации.

Поэтому в дальнейшем будем рассматривать комбинацию из оставшихся двух систем, а именно – статическую ВП с баллонным ограждением (БО) и колесное шасси.

В качестве движителей для бесконтактных эстакадных транспортных средств можно использовать (рис. 2): линейные синхронные электродвигатели (ЛСЭ) либо линейные асинхронные двигатели (ЛАД) – во всем диапазоне скоростей; или турбовинтовентиляторные двигатели ТВВД – при скоростях движения $V \approx 600 \text{ км/ч}$; турбовинтовые двигатели ТВД – при скоростях движения $V \approx 360 \text{ км/ч}$. Сравнивая их преимущества и недостатки, можно выбрать тот или иной движитель.

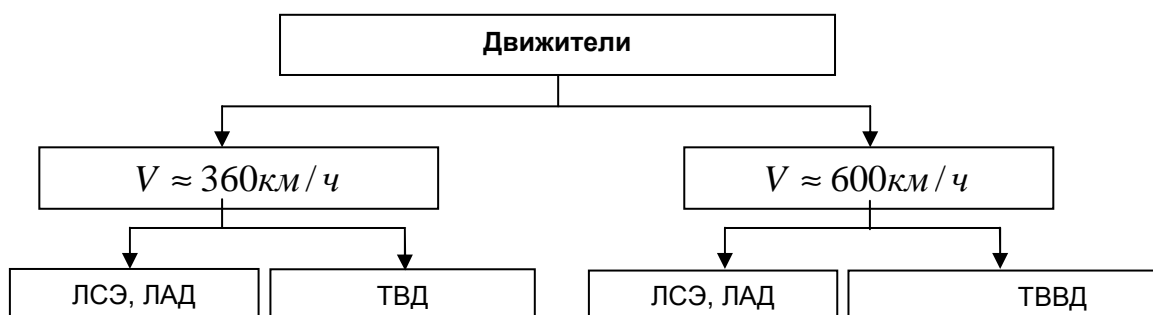


Рис. 2. Использование движителей для различных скоростей движения

К недостаткам эстакадного бесконтактного транспорта следует отнести зависимость их эксплуатации от погодных условий и шум от вентиляторных установок.

Бесконтактный трубопроводный транспорт представляет собой капсулы (грузоносители), которые движутся бесконтактно относительно трубопровода. Здесь речь идет о трубопроводном транспорте без использования вакуума. Достоинства такого транспорта – их эксплуатация не зависит от метеоусловий окружающей среды. К недостаткам можно отнести большие энергетические затраты на преодоление сопротивления от “поршневого эффекта”.

Предлагаемая транспортная система

С учетом положительных качеств эстакадных и трубопроводных транспортных средств авторы предлагают систему, состоящую из аэропоезда 1 на ВП, который движется над эстакадой 2 с аروحным укрытием 3 (рис. 3).

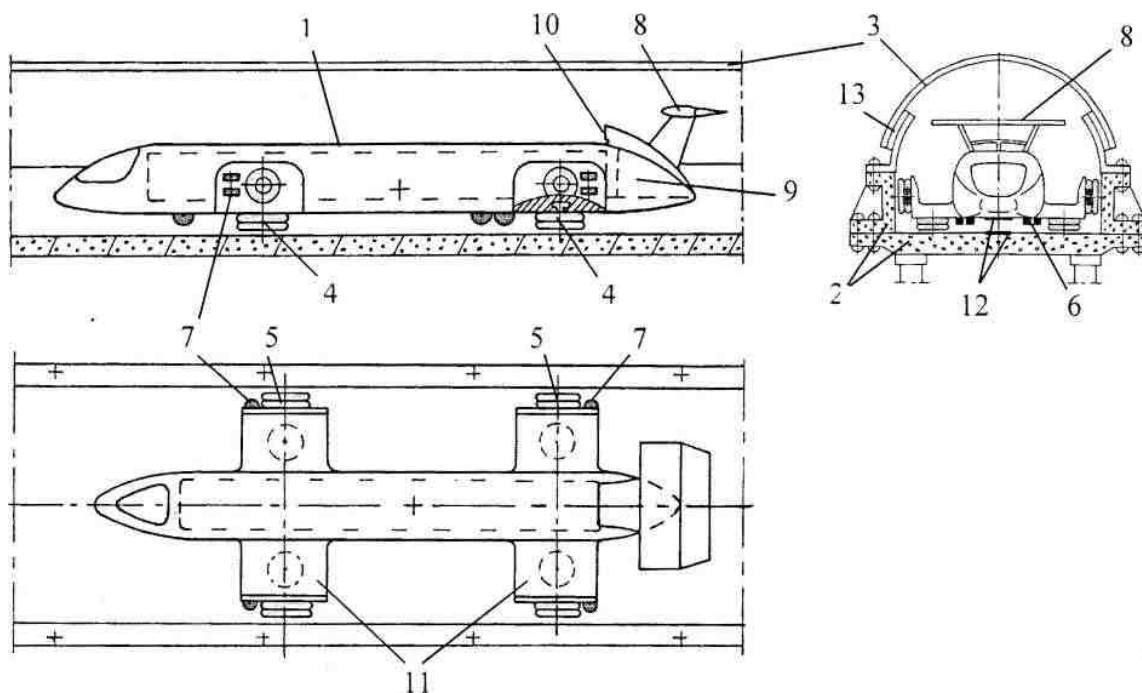


Рис. 3. Предлагаемая транспортная система:

- 1 – аэропоезд на ВП; 2 – эстакада; 3 – арочное укрытие; 4 – подъемные ВП с БО; 5 – направляющие ВП с БО; 6 – основное колесное шасси; 7 – вспомогательное колесное шасси; 8 – горизонтальное оперение; 9 – вентиляторный отсек; 10 – заборник воздуха вентиляторного отсека; 11 – центропланы; 12 – ЛСЭ; 13 – вентиляционные каналы на арочном укрытии

Арочное укрытие 3 выбрано с большими габаритными размерами в поперечном сечении и снабжено вентиляционными каналами 13. Они помимо вентиляции обеспечивают выход встречного потока воздуха при движении аэропоезда. В целом эти мероприятия минимизируют аэродинамическое сопротивление движущегося аэропоезда.

Аэропоезд содержит два центроплана малого удлинения 11 (см. рис. 3), на нижней поверхности которых закреплены четыре подъемные опоры на ВП с БО 4, а на торцевых вертикальных элементах этих центропланов закреплены четыре направляющие ВП 5. Все восемь ВП имеют одинаковую конструкцию круглой формы в плане диаметром D_o и снабжены двухъярусными баллонными ограждениями. Конструкция и принцип работы таких ВП изложены в авторских работах [6, 7, 8]. Они воспринимают все силы и моменты, действующие на аэропоезд.

Аэропоезд выполнен по самолетной схеме, снабжен основным колесным шасси 6 и вспомогательным 7, расположенным на вертикальных элементах центропланов 11. Шасси 7 вступает в работу с малыми скоростями движения, на криволинейных трассах в том случае, если баллонные ограждения направляющих ВП 5 сожмутся на весь предельный ход. В кормовой части аэропоезда расположено массивное горизонтальное оперение 8, вентиляторный отсек 9 и заборник воздуха 10. В вентиляторном отсеке расположены две вентиляторные установки (на рисунке не показаны), каждая из которых обслуживает по четыре опоры на ВП.

Гибкое ограждение ВП поднимает корпус аппарата на высоту $H_o \approx 250$ мм. Так как движение аэропоезда происходит над относительно гладкой поверхностью, то воздушный зазор истечения из ВП h_o может составлять около 2 мм.

В качестве движителей аэропоезда используют ЛСЭ 12 с дискретным приложением тяги, так же, как и у системы Hyperloop. Поэтому первичная обмотка расположена на эстакаде на некотором расстоянии друг от друга, а вторичная – на транспортном средстве. Изменение скорости движения (разгон и торможение) осуществляется изменением частоты питающего тока. Такой привод отличается бесшумностью и экологичностью.

Пневмопитание воздушных подушек

Пневмопитание ВП обеспечивается двумя нагнетательными (вентиляционными) установками, которые выполнены в виде центробежных вентиляторов с приводом от ДВС. Установки расположены в кормовой части аппарата (поз. 9 на рис. 3). Там же расположены их заборники 10. Вентиляторные установки сначала нагнетают воздух в ресивер, а затем через воздуховоды воздух направляется в подъемные и направляющие ВП (рис. 4). Причем каждый воздуховод обслуживает две ВП, а каждый вентилятор – четыре ВП.

Каждый воздуховод снабжен центробежным регулятором расхода воздуха через ВП. Это связано с преодолением криволинейных участков трассы движения. На этих участках центробежные силы создают боковую силу Z и кренящий момент вокруг продольной оси аппарата M_x .

Преодоление криволинейной трассы достигается с помощью следующих мероприятий: уменьшения скорости, перехода к колесному режиму движения, наклона трассы, а также увеличения восстанавливающих моментов от ВП путем уменьшения расхода через поднятые опоры на ВП и, соответственно, увеличения расхода через прижатые опоры на ВП.

Влияние выбранной величины воздушного зазора на параметры аэропоезда на ВП

Рассмотрим пример расчета аэропоезда на ВП со следующими исходными данными.

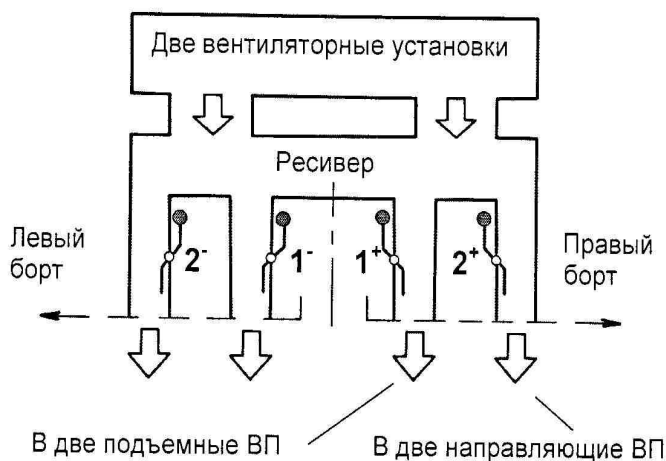


Рис. 4. Центробежные регуляторы расхода воздуха:

1^+ , 1^- – через подъемные ВП;
 2^+ , 2^- – через направляющие ВП

1. Скорость движения $V_o = 500$ км/ч (138,88 м/с). Принимаем давление в ВП ΔP_{II} равным скоростному напору, т. е. $\Delta P_{II} = q_o = \rho V_o^2 / 2 = 12$ кПа.

2. Используют две вентиляторные установки. Каждая из них обслуживает четыре ВП и имеет следующие данные – диаметр рабочего колеса $D_k = 0,8$ м; расход $Q_{V1} = 8$ м³/с; избыточное давление $\Delta P_{V1} = 18$ кПа; мощность привода вентилятора $N_{V1} = \Delta P_{V1} \cdot Q_{V1} \cdot 10^{-3} / \eta = 200$ кВт (272 л. с.).

Методику расчета рассмотрим на таком примере, который близок к системе Hyperloop.

В этом случае он рассчитан на 40 пассажиров, масса которых составляет $m_{nac} = 4$ т. В самолетостроении взлетная масса аппарата составляет $m_o = m_{nac} / 0,4$. Получим $m_o = 10$ т.

Нагрузка на одну подъемную опору на ВП составляет $m_1 = m_o / 4 = 2,5$ т. Площадь одной опоры $S_{II} = m_1 / \Delta P_{II} = 2$ м². Конструктивную площадь опоры принимаем $S_o = S_{II} / 0,9 = 2,3$ м². Конструктивный диаметр опоры

$$D_o = 2\sqrt{S_o / \pi} = 1,7 \text{ м.}$$

Периметр истечения из ВП $\Pi_1 = \pi D_o = 5,34$ м. Площадь истечения из ВП

$$f_{i1} = \Pi_1 \cdot h_o \cdot 10^{-3} = 0,00534 h_o \text{ м}^2.$$

Скорость истечения

$$V_i = \sqrt{2\Delta P_{II} / \rho} = 138,88 \text{ м/с.}$$

Объемный расход истечения из ВП $Q_i = f_{i1} \cdot V_i = 0,74 h_o$ м³/с. Так как

расход вентилятора на одну опору $Q_1 = Q_{V1} / 4 = 8 / 4 = 2$ м³/с, то воздушный зазор $h_o = 2 / 0,74 = 2,7$ мм.

Итак, для варианта аэропоезда на ВП, близкого к системе Hyperloop, имеем: $m_o = 10$ т, $h_o = 2,7$ мм,

$D_o = 1,7$ м, число пассажиров – 40.

Поступая аналогичным образом для разного числа пассажиров, получим ряд значений параметров

m_o , h_o , D_o и представим их графически (рис. 5). Из рис. 5 следует, что при изменении воздушного зазора от $h_o = 5,34$ мм до $h_o = 1,26$ мм грузонесущая способность возрастает от $m_o = 2,5$ т до $m_o = 45$ т, диаметр ВП от $D_o = 0,8$ м до $D_o = 3,64$ м, а пассажировместимость – от 10 до 180.

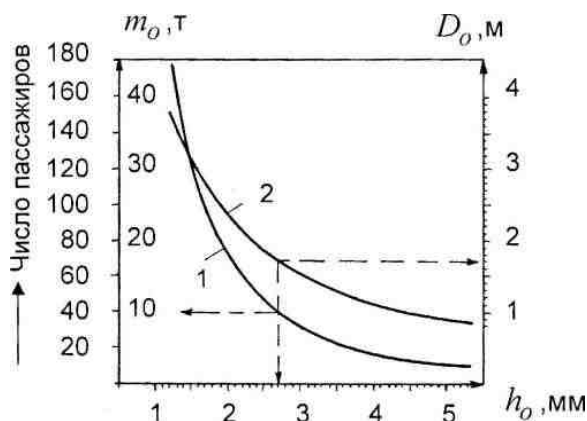


Рис. 5. Графики для выбора взлётной массы m_o , диаметра ВП D_o и числа пассажиров от воздушного зазора h_o для принятой вентиляторной установки:

1 – зависимость $m_o(h_o)$;

2 – зависимость $D_o(h_o)$

Конструктор может выбирать необходимые ему параметры в указанных диапазонах. Например, если принять $h_o = 1,5$ мм, то получим $m_o = 30$ т, $D_o = 3$ м и пассажироместимость 120 человек.

Движение аэропоезда на ВП. Расчет сопротивления и тяги

Полное сопротивление аэропоезда на ВП при движении над эстакадой с арочным укрытием представляет собой сумму основных составляющих [6, 7, 8]:

$$X = X_A + X_{II} + \Delta X_A,$$

где $X_A = q \cdot C_x \cdot S_{mid}$ – аэродинамическое сопротивление;

$X_{II} = \rho \cdot Q \cdot V$ – импульсное сопротивление, обусловленное образованием ВП;

$\Delta X_A = k_1 \cdot X_A$ – дополнительное аэродинамическое сопротивление, обусловленное ограниченным пространством внутри арочного укрытия;

C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления обтекания аппарата, который определяют по продувкам моделей (в нашем случае можно принять $C_x \approx 0,15 \dots 0,3$);

V – скорость движения аэропоезда, м/с;

S_{mid} – площадь наибольшего поперечного сечения (миделя) аппарата, м²;

$\rho = 1,2$ кг/м³ – плотность воздуха;

Q – суммарный расход воздуха, прокачиваемого нагнетателями через все опоры на ВП, м³/с;

$q = 0,5 \cdot \rho \cdot V^2$ – скоростной напор при движении аппарата;

k_1 – коэффициент, учитывающий долю сопротивления в ограниченном пространстве.

Для приближенного расчета сопротивления движению используем в нашем примере следующие исходные данные: $m_o = 10$ т; $C_x \approx 0,25$; $S_{mid} = 10$ м²; $Q = 8Q_1 = 16$ м³/с; $k_1 = 0,08$. С учетом принятых значений имеем

$$X = X_A + X_{II} + \Delta X_A = 1,58 \cdot V^2 + 19,2 \cdot V.$$

При максимальной скорости $V_o = 500$ км/ч (138,88 м/с) максимальное сопротивление будет $X_{max} = 30$ кН. Стартовую тягу T_s примем такой же, как и в самолетостроении, т. е. равной $T_s/G \approx 0,4$ или $T_s = 40$ кН.

Текущее значение тяги от ЛСЭ может быть постоянным, переменным или дискретным. Однако в любом случае тяга должна обеспечивать комфортное для пассажиров ускорение j и изменение скорости движения. Принимаем так же, как и в самолетостроении, ускорение на режиме взлета приближенно равным $j \approx 0,5g$, а перегрузку $n = (j + g)/g = 1,5$ (здесь g – ускорение свободного падения).

Чтобы определить характеристику разгона, необходимо знать зависимости силы тяги $T(V)$ и сопротивления движения $X(V)$ в функции от скорости движения. Разность между силой тяги T и суммой сил сопротивления X

представляет собой избыточную силу тяги $\Delta T(V)$, которая может обеспечить ускорение движения j , м/с²:

$$T - X = \Delta T(V) = m_o \cdot j; \quad j = \frac{\Delta T(V)}{m_o}.$$

При определении характеристики разгона аэропоезда наибольший интерес представляют зависимости “скорость – время” и “путь – время”. Их можно найти по уравнению движения аппарата в дифференциальном виде

$$m_o \cdot \frac{dV}{dt} = T - X = \Delta T(V); \quad dt = \frac{m_o dV}{\Delta T(V)}.$$

Следовательно, зависимость времени от скорости определяют в следующем виде:

$$t = m_o \int_0^{V_1} \frac{dV}{\Delta T(V)}.$$

Путь S , который проходит аппарат за период разгона от скорости $V = 0$ до скорости $V = V_1$, можно рассчитать интегрированием следующего уравнения:

$$S = m_o \int_0^{V_1} \frac{V \cdot dV}{\Delta T(V)}.$$

Для определения времени t и пути разгона (торможения) необходимо знать зависимость $\Delta T(V)$ для конкретного движителя аппарата и использовать численное интегрирование.

Расчетные технические данные предлагаемого аэропоезда

Масса аппарата взлетная, т	10
Масса 40 пассажиров, т	4
Двигатель.....	ЛСЭ
Максимальная тяга, кН	40
Максимальная скорость, км/ч	500
Давление в ВП, кПа	12
Давление вентиляторов, кПа	18
Число подъемных ВП	4
Число направляющих ВП	4
Суммарный расход через ВП, м ³ /с.....	16
Суммарная мощность на ВП, кВт	2x200
Суммарная мощность на ВП, л. с.....	2x270
Диаметр ВП, м	1,7
Воздушный зазор h_o выхода из ВП, мм	2,7
Высота подъема корпуса за счет БО ВП, м	0,25

Выводы

Предложена аэродинамическая компоновка эстакадно-трубопроводного аэропоезда на ВП как альтернатива транспортировочной системы Hyperloop, принцип работы которой основан на использовании вакуума в трубопроводе. Такая система имеет существенное преимущество, состоящее в том, что не используется вакуум и связанные с ним энергетические затраты, а также возможные риски разгерметизации при эксплуатации. Изложены методики расчета технических параметров аэропоезда на ВП. Установлена взаимосвязь пассажироместности, диаметра ВП и массы аппарата от воздушного зазора истечения h_o .

К достоинствам предложенного наземного транспорта можно отнести:

- достижение больших скоростей движения (500 км/ч);
- независимость работы от метеоусловий окружающей среды;
- повышение безопасности эксплуатации по сравнению с системой Hyperloop путем исключения вакуума в трубопроводе;
- допустимость эксплуатации как в грузовом, так и в пассажирском вариантах (ускорение $j \approx 0,5g$, а перегрузка $n = 1,5$).

Если использовать малые интервалы между движущимися аэропоездами, то предложенный транспорт целесообразно использовать на трассах с большими грузопассажирскими потоками и большими расстояниями.

Список литературы

1. Weinberg, B. P. File Hundred Miles an Hour / Popular Science, 1917. – Vol. 90. – P. 705-708 [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org>.
2. Goddard, R. H. Apparatus for vacuum tube transportation. Patent US 2488287 A (англ.). (15 November 1949) [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.google.tl/patents/US2488287>.
3. Янсуфин, Н. Р. Сверхзвуковая наземная транспортная система янсуфина. Патент РФ 2252881. Find Patent.Ru. [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.findpatent.ru/patent>.
4. J d'A Samuda. A Treatise on the Adaptation of Atmospheric Pressure to the Purposes of Locomotion on Railways, John Weale, London, 1841 [электронный ресурс]. Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric_railway.
5. Elon Musk. Hyperloop [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://dgjournal.ru/paper/hyperloop>.
6. Гребеников, А. Г. Высокоскоростной эстакадный аэропоезд на воздушной подушке [текст] / А. Г. Гребеников, В. П. Люшнин, Т. Б. Богачева, Л. А. Мальков // Открытые информационные и компьютерные технологии: сб. науч. тр. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2016. – Вып. 73. – С. 5-15.
7. Люшнин, В. П. Эстакадный и напольный транспорт на воздушной подушке [текст] / В. П. Люшнин, Л. А. Мальков. – Х. : ФЛП Лысенко И. Б., 2015. – 230 с.
8. Люшнин, В. П. Оборудование и транспорт на воздушной подушке с баллонным ограждением [текст] / В. П. Люшнин, В. Е. Гайдачук, Л. А. Мальков. – Х. : ФЛП Лысенко И. Б., 2012. – 230 с.

Поступила в редакцию 19.09.2017

Швидкісний естакадно-трубопровідний аеропοїзд на повітряній подушці

Розглянуто трубопровідні та естакадні безконтактні транспортні засоби з надзвуковою та дозвуковою швидкостями руху як у вакуумі, так і поза ним. Щоб виключити аварійні ситуації, пов'язані з вакуумом, запропоновано аеродинамічне компонування аеропοїзда на повітряній подушці, що рухається над естакадою з арочним укриттям великого поперечного перерізу. Пропозиція спрямована на досягнення досить високих швидкостей руху (500 км/год) при всепогодній безпечній експлуатації. Викладено методики розрахунку технічних параметрів такого транспорту. Розраховано параметри для конкретного прикладу.

Ключові слова: транспорт, дозвуковий аеропοїзд, повітряна подушка, балон огорожі, естакада, арочне укриття, методики розрахунків, енергетичні витрати, велика швидкість, всепогодність, траса.

High-Speed Overpass Pipeline Aerotrain on Hovercraft

Pipeline and overpass non-contact vehicles with supersonic and subsonic speeds of movement, both in vacuum and without, are considered. In order to exclude emergency situations related to vacuum, an aerodynamic arrangement of an air-cushion air train moving over an overpass with an arch cover of a large cross section is proposed. The proposal is aimed at achieving sufficiently high speeds (500 km / h) for all-weather and safe operation. The methods for calculating the technical parameters of such transport are outlined. Calculated parameters for a specific example

Keywords: transport, subsonic air train, air cushion, balloon fencing, flyover, arched shelter, calculation methods, energy costs, high speed, all-weather, route.

Сведения об авторах:

Александр Григорьевич Гребеников – д-р техн. наук, зав. каф. 103 «Проектирование самолетов и вертолетов», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.

Виктор Павлович Люшнин – ст. науч. сотр., каф. 401 «Конструкция и проектирование ракетно-космической техники», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.

Татьяна Борисовна Богачева – ст. науч. сотр., Студенческое конструкторское бюро, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.

Леонид Анатольевич Мальков – ст. науч. сотр., каф. 401 «Конструкция и проектирование ракетно-космической техники», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.