



DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-205-216

УДК 624.21.037.001.5:629.73

Научная статья / Research article


Разработка конструкции, изыскания и проектирование экваториальной эстакады общепланетарного транспортного средства

А.Э. Юницкий^{a, b} , Д.И. Бочкарев^{b, c} , С.В. Артюшевский^{b, c}  

^aОбщество с ограниченной ответственностью «Астроинженерные технологии», Республика Беларусь, 220089, Минск, ул. Железнодорожная, д. 33

^bЗакрытое акционерное общество «Струнные технологии», Республика Беларусь, 220089, Минск, ул. Железнодорожная, д. 33

^cБелорусский государственный университет транспорта, Республика Беларусь, 246653, г. Гомель, ул. Кирова, д. 34

 E-mail: s.artushevskiy@unitsky.com

История статьи

Поступила в редакцию: 26 марта 2021 г.

Доработана: 14 мая 2021 г.

Принята к публикации: 22 мая 2021 г.

Аннотация. Взлетно-посадочной полосой для общепланетарного транспортного средства служит уникальное по масштабам и сложности инфраструктурное сооружение – эстакада протяженностью 40 тыс. км, охватывающая планету по экватору и совмещенная с рельсоstrунным транспортом «второго уровня». Данное сооружение является опорной конструкцией для общепланетарного транспортного средства и коммуникационной артерией, обеспечивающей перемещение пассажиров и грузов, а также передачу больших объемов энергии и информации. Для обеспечения равномерного старта общепланетарного транспортного средства необходимо минимизировать возмущения, вызванные вертикальными и горизонтальными кривыми эстакады. При этом проектирование данного сооружения должно быть выполнено с учетом географических и природно-климатических особенностей тропиков как на сухопутных, так и морских участках. В статье рассмотрено расположение эстакады общепланетарного транспортного средства в плане, обозначены наиболее сложные участки и способы их преодоления. Предложены варианты компоновки эстакады общепланетарного транспортного средства, описаны основные функциональные зоны и конструктивные элементы. Определены факторы, влияющие на реализацию проекта, проблемы, неизбежные при разработке основных элементов, а также решения по оптимизации транспортно-инфраструктурного комплекса. Кроме того, предложены решения по оптимизации трассировки эстакады для преодоления горных участков земной поверхности с учетом требуемых взлетно-посадочных характеристик общепланетарного транспортного средства. Также проведена оценка влияния подвижного состава рельсоstrунного транспорта «второго уровня» на волновые колебания погруженного в воду транспортного тоннеля-поплавка, с целью обеспечения стабильной ровности пути для перемещения гиперскоростного транспорта и ленточных маховиков общепланетарного транспортного средства, имеющих космические скорости движения.

Ключевые слова: освоение космоса, общепланетарное транспортное средство, экваториальная эстакада, плавучий тоннель, индустриализация космоса, гиперскоростной транспорт

Для цитирования

Юницкий А.Э., Бочкарев Д.И., Артюшевский С.В. Разработка конструкции, изыскания и проектирование экваториальной эстакады общепланетарного транспортного средства // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 2. С. 205–216. doi: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-205-216

© Юницкий А.Э., Бочкарев Д.И., Артюшевский С.В., 2021



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>


Development of the structure, survey and design of the equatorial overpass of the General Planetary Vehicle

Anatoli E. Unitsky^{a, b} , Dmitriy I. Bochkaryov^{b, c} , Sergey V. Artyushevsky^{b, c}  

^aAstroengineering Technologies LLC, 33 Zheleznodorozhnaya St, Minsk, 220089, Republic of Belarus

^bUnitsky String Technologies, Inc., 33 Zheleznodorozhnaya St, Minsk, 220089, Republic of Belarus

^cBelarusian State University of Transport, 34 Kirov St, Gomel, 246653, Republic of Belarus

 E-mail: s.artushevskiy@unitsky.com

Article history

Received: March 26, 2021

Revised: May 14, 2021

Accepted: May 22, 2021

Abstract. The runway for the General Planetary Vehicle is a unique in scale and complexity infrastructural construction — an overpass with a length of 40 000 km, covering the planet along the equator and combined with a string-rail transport of the “second level”. This high-tech structure is a supporting structure for the General Planetary Vehicle and a communication artery that ensures the movement of passengers and goods, as well as the transfer of large amounts of energy and information. The article discusses the location of the overpass in the plan, indicates the most difficult sections and ways to overcome them. The options for the layout of the General Planetary Vehicle overpass are proposed, the main functional areas and structural elements are described. Significant factors affecting the implementation of the project, the problems inevitable in the development of the main elements, as well as solutions to optimize this transport and infrastructure complex have been identified. Solutions were proposed to optimize the overpass routing to overcome mountainous areas of the earth’s surface, considering the required takeoff and landing characteristics of the General Planetary Vehicle.

Keywords: space exploration, General Planetary Vehicle, equatorial overpass, floating tunnel, space industrialization, hypersonic transport

For citation

Unitsky AE, Bochkaryov DI, Artyushevsky SV. Development of the structure, survey and design of the equatorial overpass of the General Planetary Vehicle. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2021;22(2):205–216. doi: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-205-216

Введение

Одной из основополагающих тенденций современного мирового развития является глобализация экономических, политических и социальных процессов, затрагивающая практически все сферы общественной жизни. В этих условиях экономика любой страны тесно связана с мировой экономикой, поэтому экономическое развитие в национальных рамках и внешнеэкономические связи становятся звеньями одной цепи.

Дальнейшее стабильное экономическое развитие стран мира характеризуется ростом его зависимости от источников энергетических и сырьевых ресурсов вследствие их ограниченности и сильного влияния на мировую динамику цен. Исходя из главных тенденций эффективного развития, транспортно-инфраструктурные комплексы можно считать одним из важ-

нейших факторов мировой экономики, фундаментом хозяйственного и промышленного процветания регионов. В настоящее время интенсивно формируется единая транспортная система, базирующаяся на географическом размещении и ресурсном потенциале стран с объединением сетей транспортных потоков, связывающих разные континенты для обеспечения товарооборота и международного транзита. Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод — транспортные системы на одном уровне с финансовой, политической и социальной становятся одним из важнейших базисов, гарантирующих и обеспечивающих устойчивое развитие мирового сообщества.

В то же время, несмотря на то, что история развития транспорта отчетливо демонстрирует его ключевую роль в развитии общества и становлении нашей техногенной цивилизации [1], по мнению авторов, наступил

момент, когда необходимо придать слову «транспорт» новое значение — спасителя земной биосферы. Это возможно, если он станет геокосмическим и разделит в пространстве техносферу и биосферу, переместив опасные и вредные производства в ближний космос. Решение, как это сделать, разработал А.Э. Юницкий [2], который предложил создать общепланетарное транспортное средство (ОТС), первые публикации о котором увидели свет еще в 1982 г. во всесоюзных научно-популярных журналах «Изобретатель и рационализатор» № 4 и «Техника — молодежи» № 6. Грузоподъемность такой системы (10 млн т), опоясывающей планету по экватору, позволяет поднять за один старт целые заводы, в отличие от современной ракетной техники, низкая грузоподъемность которой, наряду с чрезвычайно высокой дороговизной геокосмических перевозок, является основным сдерживающим фактором для индустриализации космоса.

В качестве стартовой площадки для ОТС выступает эстакадное строение, расположенное по линии экватора. Оно объединяет в себе различные функции, основными из которых являются пассажиро- и грузораспределение, создание взлетно-посадочной площадки, вокзалов прибытия/отправления, а также транспортно-логистических узлов. В глобальном смысле экваториальная эстакада является мировым дорожным коммуникационно-инфраструктурным комплексом, объединяющим государства, материки и острова, расположенные в зоне экватора.

Дороги во все времена были связующими артериями между городами, вдоль которых формировались новые населенные пункты. При их возведении человек на заре времен подстраивался под существующий рельеф, а в дальнейшем научился менять его. Подобные работы выполняются на протяжении многих тысяч лет. Экваториальная эстакада не станет исключением. Экватор пересекает равнины, горы и океаны. Сложность и уникальность данного объекта заключается в его чрезвычайно большой протяженности (40 075 км) и чередовании по длине решений сухопутных эстакад и океанических участков плавучих тоннелей. Главными препятствиями на суше являются горы: Восточно-Африканское нагорье (г. Килиманджаро) в Африке и Анды (г. Чимборасо) в Южной Америке. На водных участках можно условно принять постоянный уровень поверхности

и линию горизонта, но как обременение выступает многокилометровая глубина дна.

Так как размещение подобной конструкции по поверхности земли и воды разделит планету преградой на два полушария, практически полностью перерезав все существующие сообщения (кроме воздушных), напрашивается требование размещать сооружение на опорах выше уровня земли на суше и углублять ниже уровня воды в океанах.

Идеальная траектория эстакады — это правильный круг с центром в центре масс Земли. Реализовать такое, к сожалению, невозможно. Но за счет правильного подбора геометрических параметров опорных элементов можно максимально приблизиться к такому размещению. Характеристики траектории прохождения горных участков влияют на высоту опор и глубину фундаментов эстакады, а форма — на условия работы линейных роторов внутри корпуса. Любое отклонение продольной оси ОТС от идеального круга приводит к усложнению конструкции этого грандиозного по размерам самонесущего летательного аппарата и требует дополнительных мер по его стабилизации после взлета. Вертикальные и горизонтальные кривые создают дополнительную нагрузку от центробежных сил при движении ленточных маховиков со скоростью до 12 км/с, нарушая баланс и превышая штатные силы, приходящиеся на каждый погонный метр системы, находящейся в динамическом равновесии.

1. Траектория расположения эстакады

Исходные данные для выбора траектории эстакады

В качестве геометрических граничных условий приняты:

- минимальный вертикальный радиус трассы — 100 км;
- оптимальный вертикальный радиус трассы — 6371 км (радиус Земли);
- оптимальная высота эстакады — 20–25 м (обеспечивает минимальное влияние на рост лесов и миграцию животных);
- оптимальная глубина размещения плавучих тоннелей — 40–50 м.



Рис. 1. Схема прохождения эстакады ОТС по континенту Африка

Расположение эстакады в плане

Продольный профиль построен по высотам рельефа по линии экватора¹. Начало отсчета принято от Гринвичского меридиана. Характерные участки трассы в профиле по Африке — горы высотой до 3,5 км, перед и за озером Виктория (рис. 1).

Около 43° восточной долготы трасса проходит по Индийскому океану. Максимальная глубина океана — 5,5 км, уменьшение глубины до 50 м наблюдается в районе Мальдивских островов (73° восточной долготы), у побережья и восточнее острова Суматра, протяжением около 420 км, где глубины составляют 9—50 м. Далее 109° восточной долготы — западный берег острова Калимантан, затем Макасарский пролив шириной 180 км, имеющий среднюю глубину 2,2 км с 60 км материковой отмелью (глубина 12 м) восточнее острова Калимантан. Затем трасса пересекает остров Сулавеси (120° восточной долготы), залив Томини, Молуккское море, остров Хальмахера и выходит в Тихий океан. Максимальная глубина океана по трассе около

6 км (147° восточной долготы). Имеются три выхода материкового дна:

- острова Гильберта, 173° восточной долготы;
- острова Лайн, 160° западной долготы;
- острова Галапагос, 92° западной долготы.

Материк Южная Америка начинается на меридиане 80° западной долготы (рис. 2).

Около 77° западной долготы поднимается самая высокая точка профиля материка — горы Кордильеры высотой 5 км. Далее по материку профиль спокоен до Атлантического океана — 47° западной долготы. Максимальная глубина океана 7,6 км — 17° западной долготы.

Общая протяженность трассы 40 075 км, в том числе:

- по воде (океаны, моря, заливы, озера, реки) — 31 170 км;
- по суше (материки, острова) — 8 905 км.



Рис. 2. Схема прохождения эстакады ОТС по континенту Южная Америка

¹ Google Earth [Электронный ресурс]. — URL: <https://earth.google.com> (дата обращения: 06.04.2021).

2. Особенности прохождения экваториальной эстакады по суше

Наиболее сложные участки трассы в профиле Африки — горы восточнее озера Виктория в пределах 36—38° восточной долготы. В Южной Америке наиболее сложный участок — горы Кордильеры — 77—78° западной долготы.

Проектируя траекторию расположения эстакады через данные участки, требуется определить параметры для построения радиусных и переходных кривых, исходя из ограничения величины центробежных сил при следующих характеристиках ОТС:

— линейная скорость движения ротора вдоль вакуумного канала — до 12 км/с при собственном весе до 450 кг/м.п;

— масса погонного метра ОТС вместе с грузом — до 1 150 кг/м.п.

Чем меньше допустимый радиус кривизны эстакады, тем лучше она повторяет рельеф земли и тем меньше будет максимальная высота опор. При этом прохождение г. Килиманджаро большими радиусами (1 000 км и выше) потребует большего объема работ, чем при прокладке через Анды, которые значительно выше африканских гор, но имеют более пологий рельеф.

Опоры эстакады предлагается выполнять железобетонными, высотой до 300 м (показатель самых высоких опор современных мостов). При необходимости применения большей высоты, требуемый габарит можно компенсировать с помощью локальных насыпей из добытой при устройстве выемки горной породы (рис. 3).

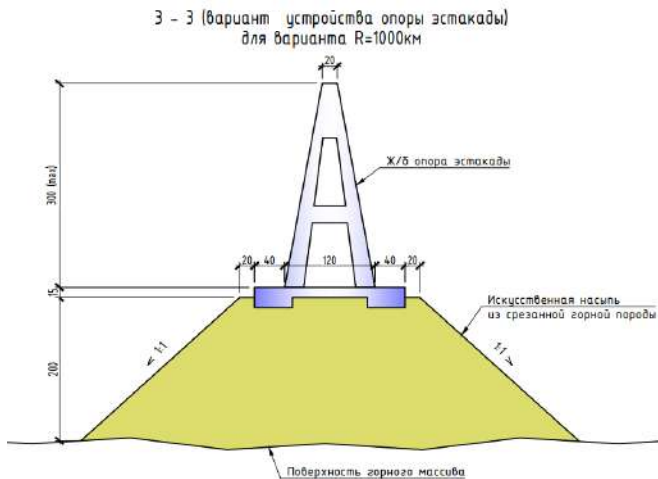


Рис. 3. Пример выполнения железобетонной опоры (вариант)

При среднем шаге опор 100 м их количество составит:

$$N = 8905000 / 100 = 89050 \text{ шт.}$$

При этом получаем процентное распределение категорий опор по высоте:

- до 15 м — 50 % — 44 525 шт.;
- от 15 до 30 м — 25 % — 22 262 шт.;
- от 30 до 50 м — 15 % — 13 358 шт.;
- от 50 до 100 м — 10 % — 8 905 шт.

Самые высокие вершины, характеризующиеся резкими перепадами высот, выгоднее проходить насквозь. При этом особенностью строительства экваториальной стартовой эстакады является необходимость наличия открытого пространства над сооружением для подъема ОТС, что исключает проход горных массивов с помощью тоннелей. Это приводит к применению выемок. Пример такой конструкции показан на рис. 4.

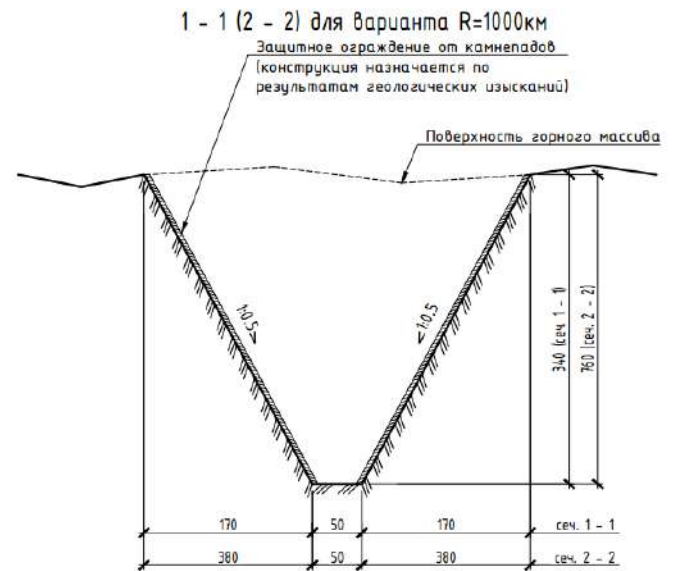


Рис. 4. Схема выполнения выемок (вариант)
(все размеры даны в метрах)

Такие характеристики выемок, как глубина, минимальный уклон откоса, защитные и предохранительные элементы, рассчитываются индивидуально для каждого горного участка в зависимости от состава и прочности породы, сейсмической активности, количества осадков и пр.

3. Особенности прохождения экваториальной эстакады по водным участкам

Как показывают предыдущие исследования, можно сделать вывод, что подводное расположение океанических участков взлетно-посадочной конструкции ОТС менее материалоемко, более технологично и в результате экономически более выгодно. Следовательно, оптимальным вариантом конструкции пролетов при прохождении глубоководных участков является плавучая эстакада. Она представляет собой погруженный на глубину 50 м тоннель. Это концепция, предложенная автором ОТС более 40 лет назад [3], в настоящее время разрабатывается учеными Норвегии, Италии и Китая [4]. Плавучая эстакада должна быть рассчитана на то, чтобы выдерживать внешние воздействия, эксплуатационные и случайные нагрузки, с достаточной прочностью и продольной изгибной жесткостью. С учетом протяженности сооружения необходима универсальная и экономичная конструкция.

Основные компоненты плавучей эстакады:

- элементы анкерения — якоря, понтоны, опоры;
- элементы крепления и натяжения;
- вакуумные грузопассажирские транспортные тоннели;
- зоны посадки/высадки пассажиров и обслуживающего персонала;
- производственные и коммунальные тоннели;
- грузовые транспортные тоннели для обеспечения грузораспределения;
- пассажирские и грузовые транспортные средства;
- опорные элементы общепланетарного транспортного средства.

Благодаря продольному направлению течений на экваторе и обеспечению нулевой плавучести тоннеля конструкция эстакады обеспечивает максимальную длину пролетов — межопорные расстояния достигают 500–800 м. Данные промежутки обеспечат требуемую жесткость и прочность несущей части сооружения.

Поскольку тоннель расположен на глубине порядка 50 м, важно, чтобы он обладал абсолютной водо-

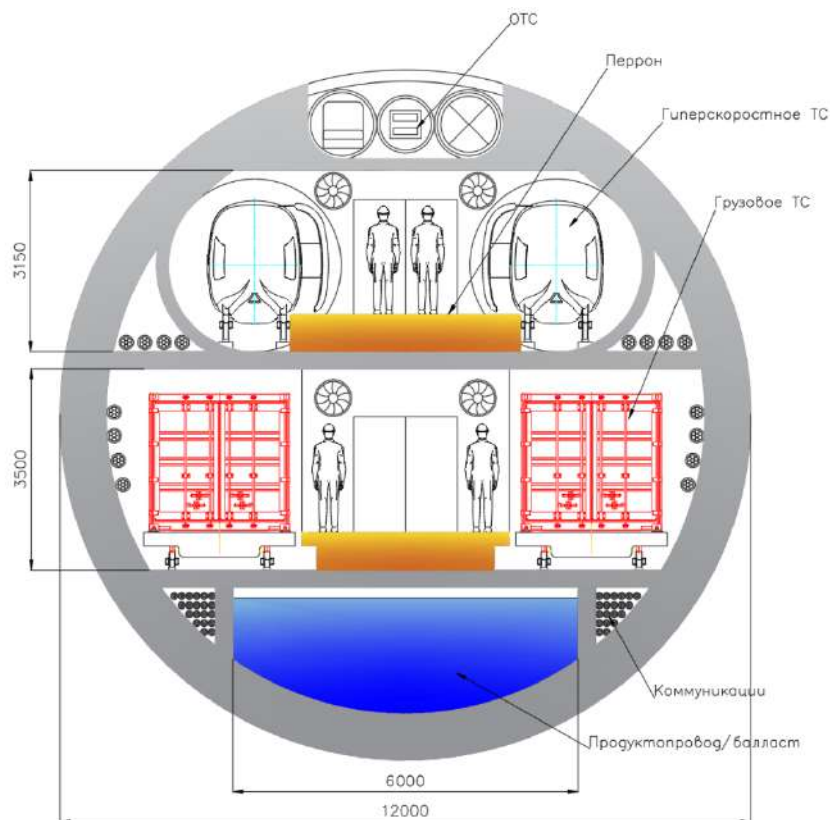


Рис. 5. Вариант компоновочного решения океанического участка плавучей эстакады в зоне посадочной станции

непроницаемостью и устойчивостью к воздействию соленой морской воды. Кроме того, тоннель необходимо надежно защитить от направленных на него гидростатических и гидродинамических сил.

Компоновочные решения плавучего тоннеля

Для максимальной унификации профиль самой эстакады, проходящей на суше, соответствует профилю океанических участков с понижением требований к герметичности и с учетом тепловой деформации от колебаний температуры. На рис. 5 изображено рекомендуемое компоновочное решение в зоне посадочной станции.

Геометрически оно разделено на четыре функциональные зоны — в центральной нижней зоне располагается продуктопровод-балласт для регулировки плавучести сооружения и доставки пресной воды из устья р. Амазонка вдоль экватора (в том числе в Африку и Малайский архипелаг), сечение имеет площадь 11 м^2 в поперечнике. По краям балластного отсека располагаются отсеки для коммуникаций. Выше размещена зона грузовых транспортных средств

с терминалами погрузки/выгрузки. Над грузовыми отсеками базируются тоннели для движения вакуумных гиперскоростных транспортных средств в разных направлениях и подводные станции для посадки/высадки пассажиров. В верхней части — ложемент для приема и старта ОТС с участком посадки и загрузки транспортных отсеков.

Внешняя бетонная труба имеет наружный диаметр 12 м и общую толщину стенок 0,6 м (рис. 6). Внутри труба разделена бетонными перегородками. Пространство за перронами и посадочными отсеками в продольном направлении используется как коридор для эвакуации и технического обслуживания конструкции. Свободные помещения по краям гиперскоростных тоннелей могут быть отведены под вентиляционные каналы и электроснабжение.

Изображенный вариант, при средней плотности морской воды в экваториальной зоне (1020 кг/м^3), имеет массу 1 м.п. конструкции 115,3 т. При использовании в качестве основного конструкционного материала бетона, с плотностью 2500 кг/м^3 , его приведенная площадь, для обеспечения нулевой плавучести, составит 46 м^2 (без учета компенсации жидким балластом).

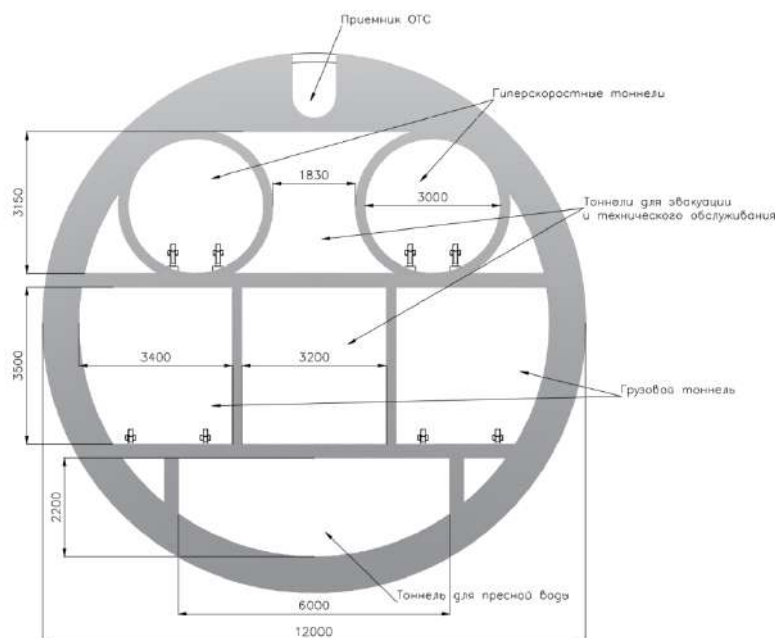


Рис. 6. Вариант компоновочного решения океанического участка плавучей эстакады в межпролетном сечении

Железобетон является основным конструктивным элементом внутренних компонентов, который дает требуемую прочность и вес тоннелю. Схема корпуса тоннеля приведена на рис. 7. Для защиты бетона от внешних воздействий оболочка дополнена тремя слоями. Наружный слой выполнен из коррозионно-стойких медных сплавов [5] для противостояния солевой воде и обрастанию моллюсками. Второй и третий слой сделаны из вспененных материалов, обеспечивающих упругую зону деформации тоннеля от внешних ударных нагрузок.

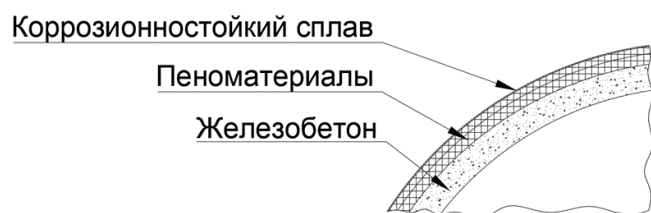


Рис. 7. Схема корпуса тоннеля

Для труб предлагается использовать специальный высокопрочный бетон с волокнистым наполнителем, имеющий модуль Юнга 30 ГПа. Оболочка должна быть обжата продольной арматурой для исключения трещинообразования, при этом конструкция в целом должна быть растянута для обеспечения устойчивости и сопротивляемости поперечным нагрузкам и изгибающим моментам. Это достигается за счет сегментирования трубы и применения различных по функционалу струнных элементов в конструкции.

В местах крепления систем фиксации (якорения) плавающей эстакады к морскому дну необходимо обеспечить избыточную плавучесть. В основу конструкции положен принцип перевернутого маятника — труба в таких местах имеет специальный поплавок, стремящийся всплыть, но удерживаемый на месте тягами, при таком якорении не допускается ослабление этих тяг (рис. 8). Привязи могут располагаться вертикально или комбинироваться вертикально и/или наклонно.

Периодически, для обеспечения тоннелей свежим воздухом и возможности эвакуации, необходимо включить в конструкцию вертикальные шахты-выходы на поверхность океана (рис. 9) [4].

В качестве плавающих элементов предложены понтоны. Они подвержены столкновению с плавающими объектами и судами, поэтому для исключения передачи ударных нагрузок с понтона на тоннель в случае случайного столкновения судна осуществляются следующие профилактические мероприятия:

- плавучая эстакада конструктивно независима, имеет отдельное якорение, потеря понтона не влияет на его геометрию и структурную целостность;
- воздушные камеры понтонов имеют ячеистую конструкцию, что позволит даже в случае повреждения герметичности половины камер остаться на плаву;
- благодаря применению многослойных сэндвич-конструкций при повреждении внешних слоев общая герметичность не будет нарушена;
- разделение понтона на два элемента для обеспечения взлета/посадки ОТС в центре трубы — вы-

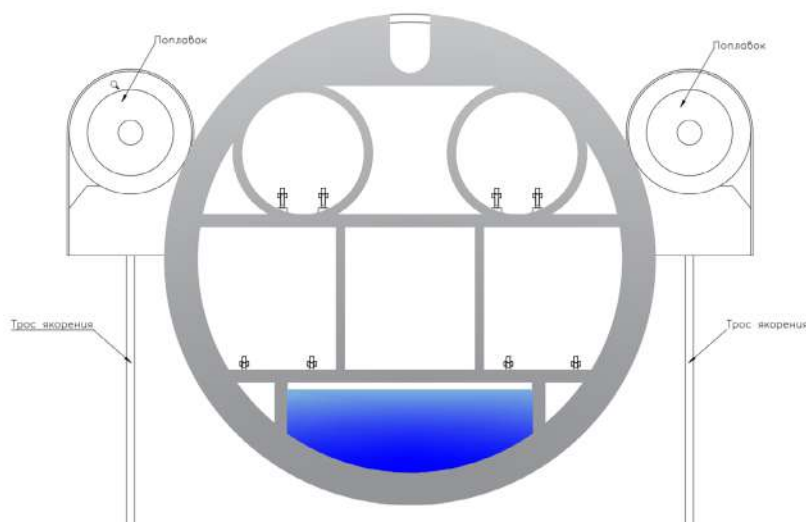


Рис. 8. Вариант компоновочного решения океанического участка плавучей эстакады, сечение в месте крепления систем якорения

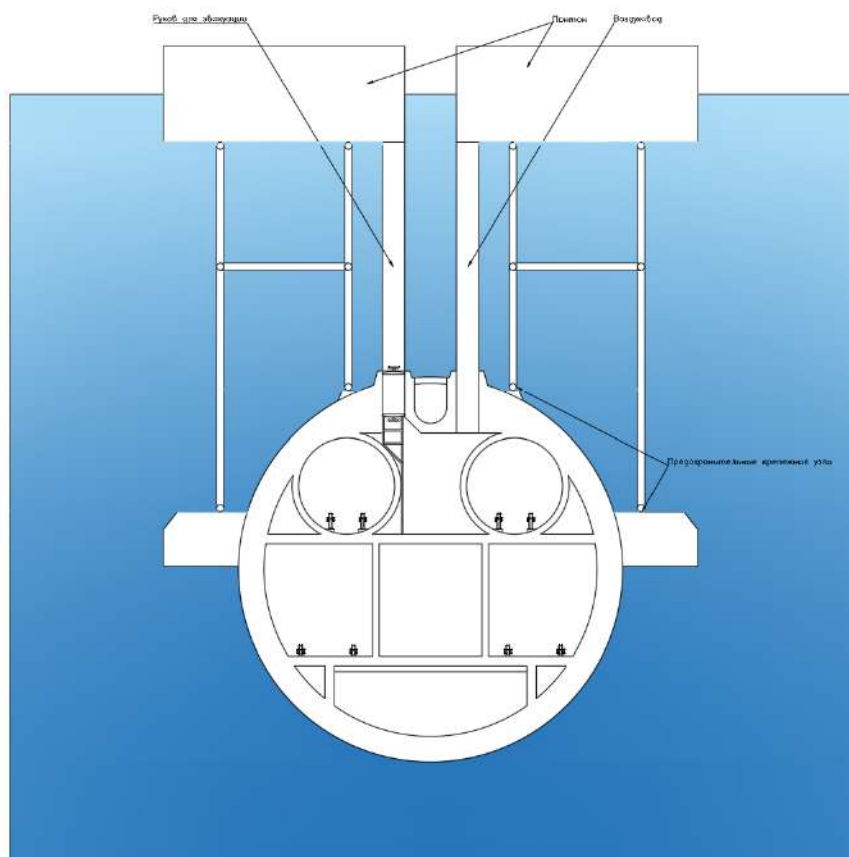


Рис. 9. Вариант компоновочного решения океанического участка плавучей эстакады, сечение в месте крепления понтонов

ступает как дублирование системы эвакуации и забора воздуха, снижая риски потерь;

— введение в конструкцию крепления понтона к эстакаде предохранителей, разрушающихся в случае превышения ударной или волновой нагрузки;

— применение обтекаемых форм понтонов, снижающих гидро- и аэродинамический коэффициент сопротивления и отклоняющих корпус судна вследствие касательных скользящих ударов.

В качестве профилактических мероприятий с целью предупреждения столкновения на понтонах устанавливаются сигнальные звуковые и световые маяки.

4. Анализ влияния движущегося транспортного средства на тоннель

Для обеспечения комфортных условий перемещения гиперскоростных транспортных средств (ТС) в тоннеле необходимо гарантировать высокую ров-

ность и стабильность пути, а с учетом наличия внешних и внутренних возмущающих факторов в виде течений, волн, проплывающих судов и движущихся внутри грузовых ТС это становится сложной задачей. Каждый из перечисленных возмущений требует глубокого анализа как в отдельности, так и вместе для учета синергичности. В данной статье авторы предлагают кратко рассмотреть предсказуемый и управляемый фактор — влияние проезжающего транспортного средства на плавучий тоннель.

Исходные данные:

— применяемый бетон имеет модуль Юнга 30 ГПа;

— тоннель диаметром 12 м;

— толщина стенки 0,6 м;

— длина фиксированного участка 800 м;

— расчетная масса 115 300 кг/м.п.;

— плотность водной среды 1,020 кг/м³;

— расчетная жесткость на изгиб $1,50 \times 10^{10}$ кН×м;

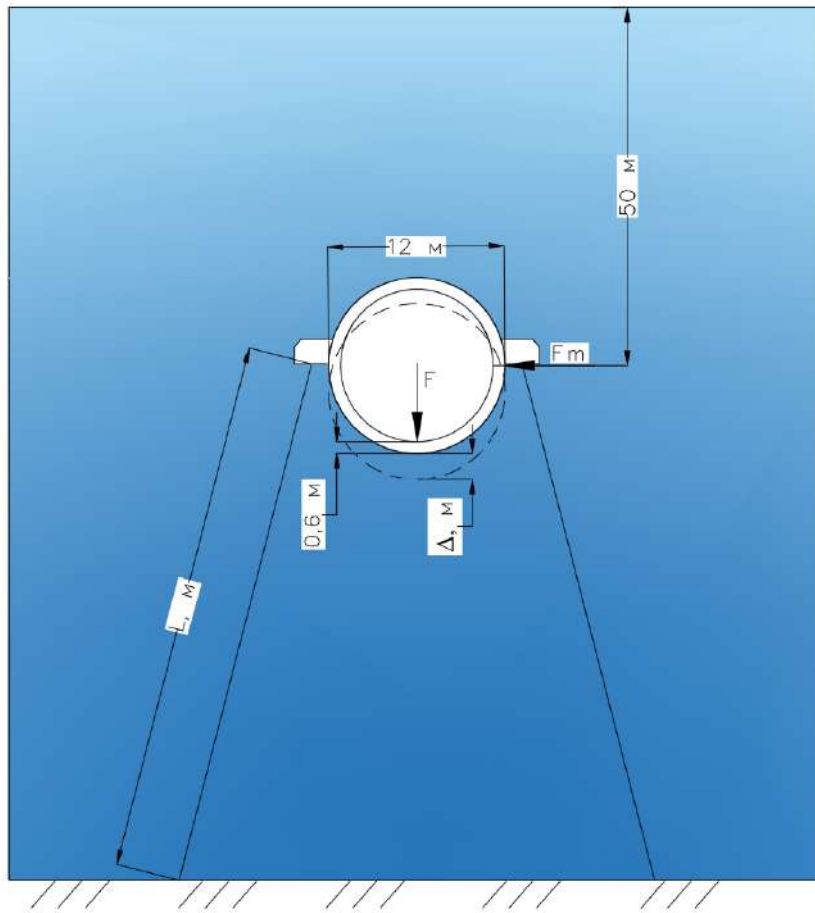


Рис. 10. 2D-схема нагрузок, воспринимаемых плавучим тоннелем

- глубина погружения тоннеля 50 м;
 - коэффициент сопротивления формы 0,55 (длинный цилиндр);
 - вес одиночного груженого грузового ТС 25 000 кг;
 - длина одиночного грузового ТС — 22 м;
 - периодичность движения транспорта 90 с;
 - расчетные скорости 10 м/с, 30 м/с, 50 м/с.
- Допущения:
- изгибные свойства тоннеля во всех направлениях одинаковы;
 - направление волн — перпендикулярно продольному направлению трубы;
 - ТС движется симметрично в центре тоннеля;
 - Нагрузка от ТС равномерно распределяется по длине;
 - ТС движется с постоянной скоростью.

2D-схема нагрузок, воспринимаемых плавучим тоннелем, изображена на рис. 10.

Грузовое ТС во время движения образует дополнительную гравитационную силу и силу инерции как в вертикальном, так и горизонтальном направлениях. Гравитационные и инерционные силы, действующие на пролет, могут быть выражены следующим уравнением:

$$F = -(Pk + ma) \sum_{E=ei}^{el} \delta(E_x - E),$$

где P — гравитационная сила; m — масса движущегося транспортного средства; δ — функция двух переменных, или дельта-функция Кронекера; E_x — участок, подверженный нагрузке; E — все участки от ei (начальный) до el (последний), подверженные движущейся

нагрузке на определенном временном интервале; a — вектор ускорения.

Исследованы эффекты волновых возбуждений, связанных с движущимся транспортным средством, и вертикальные отклики плавучего тоннеля в середине пролета (400 м от места анкерения) для различных скоростей транспорта. Расчеты показали, что максимальное вертикальное перемещение (прогиб) составляет менее 1 мм (рис. 11).

Это значительно меньше по сравнению с вызванными штормом или подводным землетрясением волновыми возбуждениями. Это подтверждают и другие исследования [6; 7]. Продолжительность прогиба пролета при прохождении ТС уменьшается с увеличением скорости, в то время как его величина остается практически одинаковой независимо от скорости движения (в пределах 3 % погрешности).

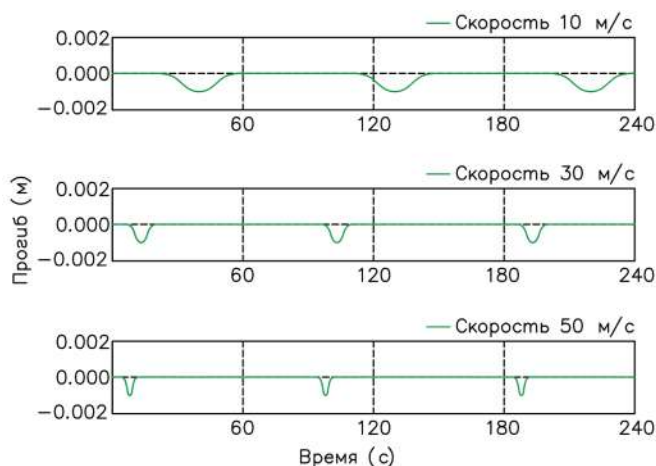


Рис. 11. Графики зависимости вертикальных перемещений тоннеля от скорости при проезде грузового транспорта

Выводы

Приведенные в статье основные технические решения, принимаемые при проектировании экваториальной эстакады общепланетарного транспортного средства, могут быть реализованы при современном технологическом уровне транспортного строительства. Это свидетельствует о технической возможности осуществления данного проекта. В то же время полный учет всех факторов, оказывающих влияние на экваториальную эстакаду на протяжении ее жизненного цикла, возможен с помощью математического моделирования

на стадиях строительства, эксплуатации, модернизации и утилизации. Данная модель позволит выполнить более детальную проработку как отдельных элементов, так и всей эстакады во взаимодействии с транспортными, природными и техногенными нагрузками, что позволит выработать наиболее оптимальные технические и технологические решения по ее созданию.

Выдвинут вариант компоновки эстакады ОТС с описанием функционала отдельных зон и конструктивных элементов. Все решения требуют продолжения технического и экономического анализа.

Также рассчитано влияние проезжающего грузового транспортного средства на волновые колебания тоннеля, погруженного в воду, для обеспечения плавного и комфортного движения гиперскоростного транспорта. Данное исследование требует более глубокой проработки с учетом всех внешних и внутренних возмущающих факторов и взаимной синергичности.

Список литературы / References

1. Малых Г.И. Краткая история развития транспортной техники // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. № 1 (21). С. 169—172.
Malykh GI. Brief History of the Development of Transport Technology. *Modern Technologies. System Analysis. Simulation*. 2009;(21):169—172. (In Russ.)
2. Unitsky A. *String Transport Systems: On Earth and in Space*. Minsk, Belarus. SkyWay Technologies Publ.; 2019.
3. Юницкий А.Э. Инженер. М.: Изд-во Эксмо, 2020. 404 с.
Unitsky AE. *Engineer*. Moscow: Eksmo Publishing House, LLC; 2020. (In Russ.)
4. Simovic M, Krasic S, Nikolic M. Floating Solutions: The New Meaning of Mobility. In: Wang C., Lim S., Tay Z. (eds.) *WCFS2019. Lecture Notes in Civil Engineering* (vol. 41). Springer, Singapore. doi: 10.1007/978-981-13-8743-2_23
5. Palraj S, Venkatachari G, Subramanian G. Bio-fouling and Corrosion Characteristics of 60/40 brass in Mandapam Waters. *Anti-Corrosion Methods and Materials*. 2002;43(9):194—198. doi: 10.1108/00035590210426445.
6. Jin C, Kim M. Dynamic Responses of a Moored Submerged Floating Tunnel under Moving Loads and Wave Excitations. *The 28th International Ocean and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers*. 2018.
7. Yuan Z. et al. Displacement Response of Submerged Floating Tunnel Tube Due to Single Moving Load. *Procedia engineering*. 2016;166:143—151. doi: 10.1016/j.proeng.2016.11.577.

Сведения об авторах

Юницкий Анатолий Эдуардович, генеральный конструктор, Общество с ограниченной ответственностью «Астроинженерные технологии»; генеральный конструктор, Закрытое акционерное общество «Струнные технологии», кандидат философских наук; ORCID: 0000-0003-1574-3539; e-mail: a@unitsky.com

Бочкарев Дмитрий Игоревич, декан строительного факультета, Белорусский государственный университет транспорта; ведущий инженер, Закрытое акционерное общество «Струнные технологии», кандидат технических наук; ORCID: 0000-0002-9165-3634, eLIBRARI SPIN-код: 4100-5709; e-mail: bochk_dmitr@mail.ru

Артюшевский Сергей Владимирович, заместитель генерального конструктора по науке, Закрытое акционерное общество «Струнные технологии»; магистрант, Белорусский государственный университет транспорта; ORCID: 0000-0003-0838-9228, eLIBRARI SPIN-код: 4458-0179; e-mail: s.artushevskiy@unitsky.com

About the authors

Anatoli E. Unitsky, General Design Engineer, Astroengineering Technologies LLC; General Design Engineer, Unitsky String Technologies, Inc., Ph.D.; ORCID: 0000-0003-1574-3539; e-mail: a@unitsky.com

Dmitriy I. Bochkaryov, Dean of the Faculty of Construction, Belarusian State University of Transport; Lead Engineer, Unitsky String Technologies, Inc., Associate Professor, Ph.D.; ORCID: 0000-0002-9165-3634, eLIBRARI SPIN-code: 4100-5709; e-mail: bochk_dmitr@mail.ru

Sergey V. Artyushevsky, Deputy General Designer for Science, Unitsky String Technologies, Inc; Master's student, Belarusian State University of Transport; ORCID: 0000-0003-0838-9228, eLIBRARI SPIN-code: 4458-0179; e-mail: s.artushevskiy@unitsky.com