

## **Водные океанические участки с плавучей эстакадой**

А.Э. Юницкий<sup>1,2</sup>, доктор философии транспорта

С.В. Артюшевский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «Астроинженерные технологии», г. Минск, Беларусь

<sup>2</sup>ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь

Строительство взлётно-посадочной полосы для общепланетарного транспортного средства (ОТС) требует разработки и применения уникального по масштабу и сложности сооружения – экваториальной эстакады, охватывающей планету и совмещённой с коммуникациями: транспортом «второго уровня», энергетическими и информационными системами. Данная конструкция будет служить опорой для ОТС, а также обеспечит равномерное распределение грузов и пассажиров. Для создания экваториальной коммуникационной эстакады необходимо использование широкого спектра технических решений: начиная с разработки строительных конструкций, специального подвижного состава и заканчивая энергообеспечением и системами интеллектуального управления геокосмической транспортной инфраструктурой. В статье рассмотрены проблемы, неизбежные при реализации основных элементов морских участков экваториального транспортного комплекса, и даны способы их решения. Описаны также конструктивные особенности системы и её составляющих. Кроме этого, раскрыты некоторые технические сложности возведения эстакады и преимущества представленных решений при использовании их в экваториальной океанической зоне на всех этапах жизненного цикла сооружения.

**Ключевые слова:** глубоководный якорь, общепланетарное транспортное средство, плавучая эстакада, ЭкоКосмоДом, освоение космоса.

## 1. Введение

Планета Земля и человечество – два объекта, находящиеся вместе, однако отличающиеся друг от друга: размеры и возможности Земли ограничены, а желания и потенциал человечества – нет. Как может что-то, имеющее границы, вмещать в себя постоянно увеличивающееся нечто? Ответ один – никак, всегда наступает время, когда необходимо искать ресурсы вне системы. И здесь важно, в какой момент мы, как представители человечества, осознаем данную проблему и сделаем упреждающее действие. От нашего решения зависит, останется ли родная планета пригодной для жизни.

Как же сохранить природу Земли для будущих поколений? Единственный шаг – убрать всё, что вредит ей. Ещё К.Э. Циолковский [1] в своей программе освоения космического пространства выделил пункт – «развитие в эфире промышленности (индустрии)». Это было первое в истории высказывание об индустриализации космоса. Основоположник космонавтики писал о неограниченных размерах производственных цехов в невесомости – так как нет силы тяжести; о материалообеспечении не с Земли, а с Луны и астероидов – так как это дешевле; о поведении свободных от силы тяжести грузов. Он озвучил много других предположений, которые в то время казались фантастикой, однако сегодня его суждения уже стали реальностью.

В качестве транспортного средства для освоения космоса русский учёный предлагал использовать ракеты с реактивным двигателем. При этом он отмечал высокую стоимость и низкую производительность подобного решения, потому что ракеты требуют затрат на перемещение топлива с Земли на орбиту для дальнейшего использования. Альтернативный вариант разработал А.Э. Юницкий в [2]. Согласно его проекту основой космической

индустриализации является космическое индустриальное ожерелье «Орбита» (КИО «Орбита»). Промышленность и жилые отсеки для персонала, обслуживающего данную систему, представлены на орбите отдельными ячейками – ЭкоКосмоДомами (ЭКД) [3]. Объединённые между собой, они могут тянуться в космосе на многие километры и связываться в «ожерелья», длина которых теоретически не ограничена. Обладая кольцеобразной формой, КИО «Орбита» располагается в экваториальной плоскости Земли и охватывает планету. Для подъёма людей и грузов применяется общепланетарное транспортное средство (ОТС), также опоясывающее по экватору земной шар [3]. В момент старта центр масс ОТС совмещён с центром масс планеты. Во время подъёма положение центров масс остаётся неизменным, что способствует снижению энергетических затрат на выход в космос и исключает колебания ОТС относительно экваториальной плоскости.

Сегодня экватор является наилучшей стартовой линией для всех космических полётов и, соответственно, для постройки опорной эстакады ОТС. Благодаря использованию естественного вращения Земли такое расположение даёт большое преимущество – дополнительная скорость сокращает количество энергии, которое нужно для разгона и выведения ОТС на орбиту. Вместе с тем подобное размещение помогает избежать дорогостоящих манёвров, необходимых для стабилизации и совмещения орбиты перед стыковкой с КИО «Орбита».

Согласно расчётам, проведённым учёными Центра «Звёздный мир» [2], 31 170 км экватора проходят через океанические, морские, речные и другие воды, что требует постройки уникального сооружения – плавучей эстакады. Основные сложности, возникающие при создании данной конструкции, связаны с обеспечением её устойчивости и безопасности в случае воздействия на неё внешних природных факторов, таких как течение, ветер, волны, осадки и др. Плавучая эстакада должна выполнять функцию не только опорной площадки для старта и приземления ОТС, но и обязана отвечать за

равномерное распределение пассажиров и грузов по длине всего корпуса. Перевозочный процесс вдоль экватора может быть организован с помощью гиперскоростного транспорта на основе форвакуумной трубы со скоростью движения, близкой к скорости звука в среде.

В статье подробно рассмотрены проблемы, которые могут проявиться при реализации основных элементов морских участков экваториального транспортного комплекса, даны технические решения их выполнения. Представлены внешние природные факторы, влияющие на конструктивные особенности сооружения. Предложены возможные варианты исполнения плавучей эстакады и показан их сравнительный обзор. Описаны главные принципы и конструктивные особенности плавучей подводной эстакады. В заключительной части названы предпочтительные решения для реализации сооружения, сделаны ключевые выводы о работе, обозначены направления будущих исследований.

## **2. Внешние природные факторы, влияющие на конструктив опорной эстакады в экваториальных водах**

Разработка проектно-инженерных решений при строительстве плавучей эстакады требует учёта следующих факторов.

**Геометрия дна.** Согласно [4] экваториальные регионы имеют перепады глубин до 7680 м в районе Romanche Trench (Атлантический океан) и среднюю глубину 3000–4190 м [5]. Экватор в трёх местах пересекает срединно-океанические хребты – подводную горную цепь действующих вулканов, характеризующуюся высокой скоростью расхождения тектонических плит (5–16 см/год) и частыми землетрясениями (до пяти случаев в день на каждом хребте).

Морское океаническое дно вдоль экватора является сложным и всё ещё недостаточно изученным местом, которое принципиально отличается от земной поверхности, имеющей более длинную историю проектно-инженерных работ. Требуется подробное исследование дна океанов,

особенно в районах предположительного анкерения эстакады. Точное картирование морского дна важно для якорей. До начала проектно-строительных работ необходимы также геолого-океанографические изыскания.

**Цунами.** Согласно анализу [2] можем сделать вывод, что данный тип волн, зарегистрированный на экваторе станциями, в большинстве случаев вызван землетрясениями. Цунами по силе распределяются от умеренных (подъём воды 1–2 м) до очень сильных (подъём воды 4–8 м, всплеск до 20 м). Наиболее сильные волны зафиксированы в 1883 г. у южного побережья о. Суматра.

**Температурные режимы воздуха.** Для анализа годовых колебаний температуры (таблица 1) прослежена статистика в городах, через которые проходит экватор, но которые находятся на противоположных сторонах земного шара, – Понтианак (Индонезия) и Макапа (Бразилия).

Таблица 1 – Среднемесячная температура (°С) в г. Понтианак (Индонезия) и г. Макапа (Бразилия) [6, 7]

| Город/Месяц | Январь | Февраль | Март | Апрель | Май  | Июнь | Июль | Август | Сентябрь | Октябрь | Ноябрь | Декабрь |
|-------------|--------|---------|------|--------|------|------|------|--------|----------|---------|--------|---------|
| Понтианак   | 26,9   | 27,9    | 27,7 | 27,8   | 28,1 | 28   | 27,5 | 27,6   | 27,9     | 27,7    | 27,3   | 27,2    |
| Макапа      | 26,1   | 26,3    | 26,4 | 26,7   | 26,8 | 26,8 | 27,2 | 27,6   | 27,9     | 27,8    | 27,4   | 26,9    |

Несмотря на большое расстояние между городами (17 826 км), разность температур по месяцам составляет 0–1,6 °С, а среднегодовое колебание не превышает 1,8 °С.

**Температурные режимы воды.** На основании графика изменения температуры воды на разной глубине [8], поплавки и опоры эстакады, расположенные в водной толще до 50 м, будут находиться в тёплом поверхностном слое, с незначительным понижением температуры в пределах

градуса (численное значение составляет 29–30 °С). С увеличением глубины температура понижается более интенсивно (рисунок 1).

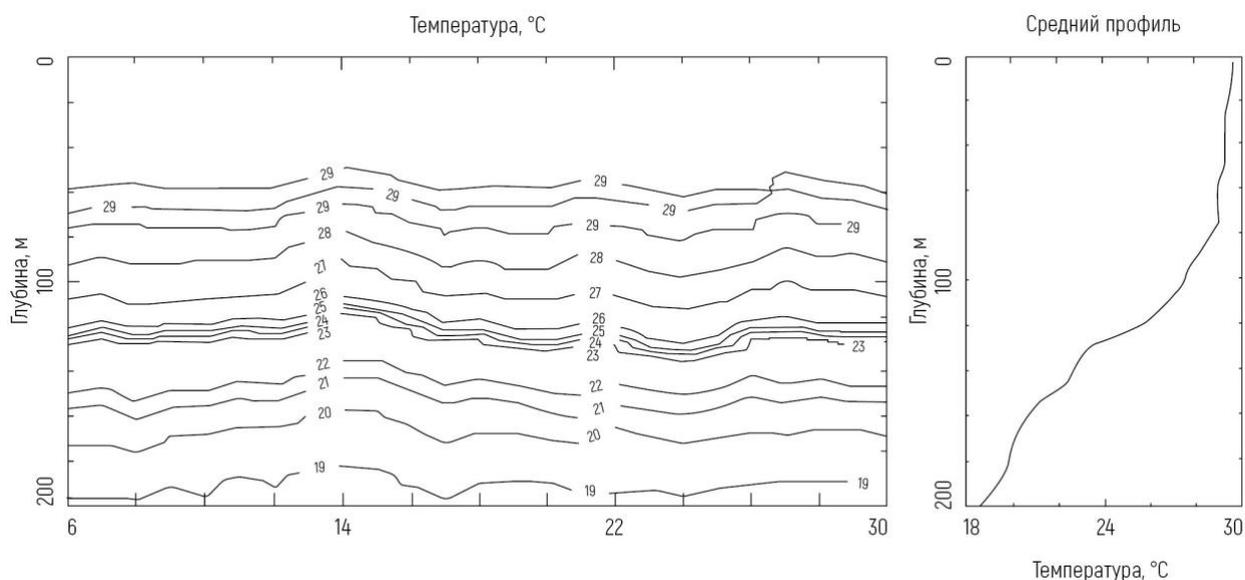


Рисунок 1 – Изменение температуры воды в экваториальной зоне на глубине до 200 м [8]

**Солёность воды.** Средняя солёность мирового океана – 35 ‰ [9], на глубине 50 м содержание солей в воде составляет 34,4 ‰ [8]; с увеличением глубины солёность незначительно повышается (рисунок 2). При проектировании плавучей эстакады необходимо предусмотреть коррозионную защиту бетонных и стальных поверхностей.

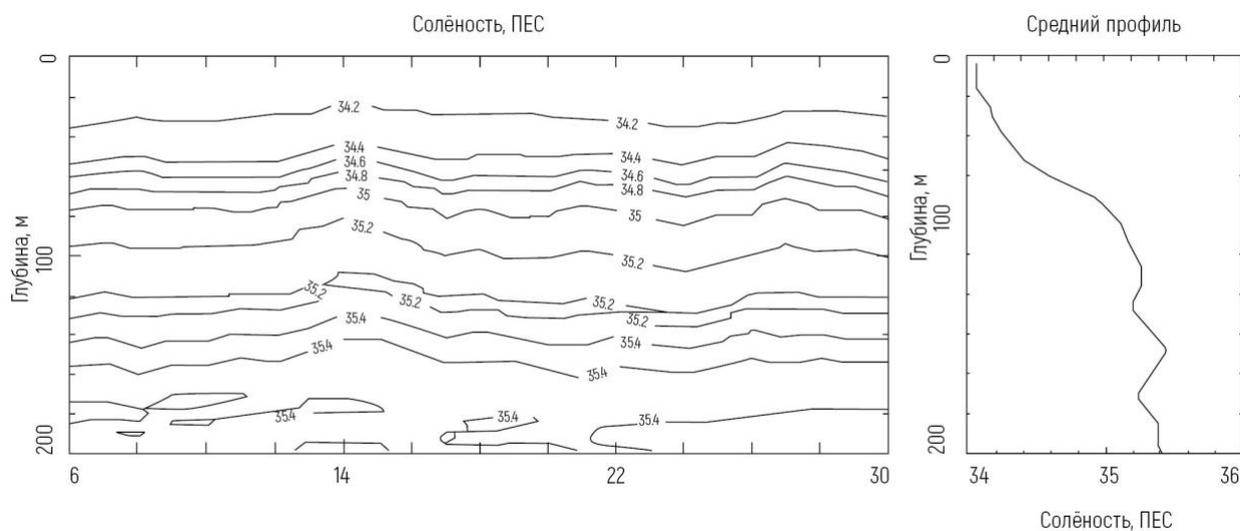


Рисунок 2 – Изменение солёности воды в экваториальной зоне на глубине до 200 м [8]

**Течение и волны.** По планируемой линии строительства сооружения наблюдаются экваториальные противотечения в Тихом и Атлантическом океанах (отклонение – около  $1^\circ$  на север и юг от экватора, средняя скорость – 1 м/с, направление – восток) и Северное пассатное течение в Индийском океане (средняя скорость – 2,8 м/с, направление – запад). Глубина течений составляет 100 м. Так как они проходят вдоль эстакады, то сооружение воспринимает только продольное силовое воздействие, стремящееся растянуть и в итоге стабилизировать систему [9, 10]. Высота волн в океанах в зоне экватора достигает 1,5 м; периодичность – 3–6 с; максимальная высота – 7,5 м [9, 10].

**Осадки.** Экваториальный морской регион характеризуется максимальным количеством осадков на планете. Их распределение вдоль линии экватора – неравномерное. Согласно исследованиям учёных Центра космической науки и техники Университета Висконсина-Мэдисона [11] самое большое количество осадков отмечено около о. Суматра (Индонезия) (примерно  $3^\circ$  ю. ш.,  $96^\circ$  в. д.). За три года анализа (1979–1981 гг.) в среднем выпадало более 4000 мм/год.

**Грозы.** По результатам анализа [2] рекордное число гроз составляет 4–5 % в год в районе о. Суматра (Индонезия), менее 0,1 % – в районе Тихого океана.

**Ветер.** По информации Национального центра климатических данных (NCDC) [12], в экваториальных зонах Тихого, Индийского и Атлантического океанов доминируют ветра́, симметрично направленные на запад под углом  $30\text{--}45^\circ$  к плавучей эстакаде. На экваторе ветра́ южного и северного полушарий встречаются и создают устойчивый поток, идущий на запад. Преобладающие ветра́ имеют скорость 5,9–8,1 м/с, порывы достигают 15 м/с.

**Давление.** При понижении глубины расположения плавучей эстакады с каждым метром давление увеличивается на 0,1 атм. На максимальной глубине 7680 м в Атлантическом океане давление в 770 раз превышает атмосферное.

**Обрастание моллюсками и водорослями.** Любая поверхность, погружённая в морскую воду, подвергается заселению морскими

организмами, которых известно более 4000 видов (бактерии, водоросли, моллюски) [13]. Данное явление известно, как загрязнение или биообрастание и имеет серьёзные последствия. Для плавучей эстакадной конструкции нежелательная «колонизация» грозит увеличением массы сооружения (масса нароста может достигать 100 кг/м<sup>2</sup>, а толщина «живого» слоя – до 70 мм) и ухудшением шероховатости поверхностей, что приводит к усилению парусности и воздействия волн и течений.

Основные факторы, влияющие на загрязнение поверхностей, – солёность, pH, температура, уровни питательных веществ, скорости потока и интенсивность солнечного излучения. Наиболее распространённое решение, позволяющее избежать обрастания системы, – сделать её поверхности непригодными для подобных «поселенцев», нанеся специальные покрытия, содержащие ядовитые соединения. Предотвращение нежелательного процесса требует постоянной пороговой концентрации биоцидов на окрашиваемой поверхности. Токсикант должен выделяться из покрытия в течение достаточно продолжительного периода, ограниченного на сегодняшний день 1–5 годами [14].

Наиболее устойчивы к коррозии и обрастанию из часто используемых материалов – сплавы на основе меди [15] (даже по сравнению с нержавеющей сталью и стеклом) [16, 17]. Медесодержащие поверхности предотвращают (или замедляют) заселение ракушек, мидий и трубчатых червей. Однако бактерии, грибы, микроводоросли и их клеточные экссудаты всё же образуют слой слизи на медесодержащих поверхностях. Со временем сплавы меди также подвержены известковому налёту, что приводит к уменьшению защитного эффекта и, как следствие, к необходимости механической чистки поверхностей.

### **3. Варианты исполнения опорной эстакады**

Эстакада может проходить на поверхности воды, над поверхностью воды и ниже уровня воды (на незначительной глубине).

### 3.1. Эстакада, расположенная на поверхности воды

Данная конструкция представляет собой сооружение, плавающее на воде или находящееся на малой высоте над водной гладью и опирающееся на поплавки-понтонны. В случае расположения эстакады на поверхности океана планета будет разделена препятствием на северное и южное полушария. Учитывая, что экваториальная зона загружена транспортными маршрутами (рисунок 3), недопустимо оставлять целые регионы без водных сообщений. Пересечение плавучей эстакады судами требует дополнительных инженерных сооружений. В качестве таких конструкций могут выступать участки, понижающие или повышающие эстакаду, перегрузочные плавающие порты, переправочные шлюзы и др. Однако они ограничивают количество точек пересечения экватора, что приводит к изменению траекторий существующих маршрутов и создаёт так называемое «бутылочное горлышко» – узкое место с ограниченной пропускной способностью.

Один из важных природных факторов, необходимый для возведения расположенной на поверхности воды эстакады, – обеспечение заметности сооружения для предотвращения столкновений с судами. На видимость и обзорность влияют осадки, туман, дымка, водяной пар, мгла и другие явления, ухудшающие прозрачность воздуха. При проектировании эстакады следует предусмотреть меры, обеспечивающие возможность заблаговременного оповещения судов о приближении к зоне строения.

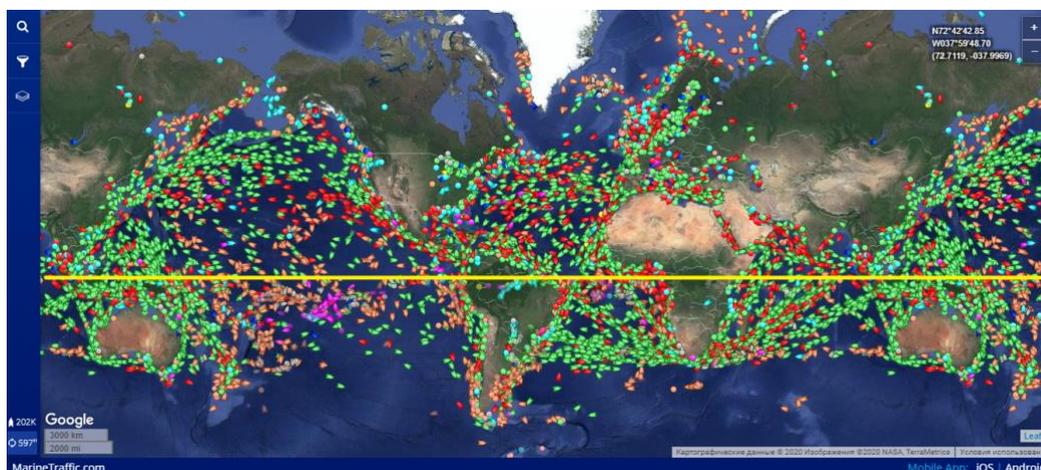


Рисунок 3 – Карта движения судов на 25 июня 2020 г. [18]

Разрабатывая плавучую эстакаду, также следует учесть, что от воздействия цунами высота всплеска волны у побережья достигает 20 м.

Исходя из незначительного изменения температуры воздуха в течение года, нет необходимости в дополнительных конструктивных элементах, компенсирующих температурные деформации. Среднесуточные колебания возьмёт на себя теплоизоляционная защита эстакады.

### **3.2. Эстакада, расположенная над поверхностью воды**

Данный тип сооружения представляет собой эстакаду, поднятую над поверхностью океана на опорах, опирающихся на поплавки-понтонны. Высота и шаг опор должны обеспечивать безопасное прохождение морских судов. Основные ограничения для рассматриваемой конструкции – размеры существующих водных транспортных средств. Максимальные габариты имеет судно *Pioneering Spirit* [19] (длина – 382 м, ширина – 124 м). Самое высокое судно среди водного транспорта – круизный корабль *Symphony of the Seas* (высота – 72 м) [20].

Учитывая максимальную скорость *Pioneering Spirit* (26 км/ч, или 7,2 м/с), его длину (382 м) и ширину плавучей эстакады (10 м), судну понадобится минимум 55 с для того, чтобы проплыть под надводным сооружением. За это время боковое течение снесёт транспорт на расстояние  $S$ , выведенное согласно (1).

$$S = V_T \times t, \quad (1)$$

где  $t$  – время движения под эстакадой, с;

$V_T$  – скорость течений в океане (скорость течений постоянно меняется как в течение суток, так и в течение года, максимальная – летом).

Показатели максимальной скорости течений для пересекаемых районов [21]:

- Атлантического океана (течение Гольфстрим) – до 7,5 м/с;
- Индийского океана (течение Южное пассатное) – до 2,14 м/с;
- Тихого океана (течение Куроисио) – 6,42 м/с.

При проектировании требуется детально проработать скорости течений на каждом участке в отдельности. На данный момент для предварительного расчёта граничных условий принята максимальная скорость 7,5 м/с. Тогда:

$$S = V_T \times t = 7,5 \times 55 = 412,5 \text{ м.}$$

С учётом ширины судна понадобится 536,5 м, чтобы свободно проплыть при максимальной скорости течения, что превышает допустимые размеры для эстакадного пролёта. Значит, необходимо внести дополнительное ограничение – крупногабаритные транспортные средства смогут проходить под плавучей эстакадой в зоне или во время низких скоростей течений с поправкой курса на снос течением.

Геометрически, с минимальными зазорами на сторону, получается пролёт между опорами  $B = 150$  м: 124 м – ширина судна плюс 10 % на зазор безопасности в каждую сторону.

Высота волн при 12-балльном ветре (скорость 30 м/с) составляет 16,8 м [22].

Минимальный коридор для 72-метрового судна – 88,8 м. С учётом 10-процентного гарантированного зазора получается  $H = 100$  м (рисунок 4).

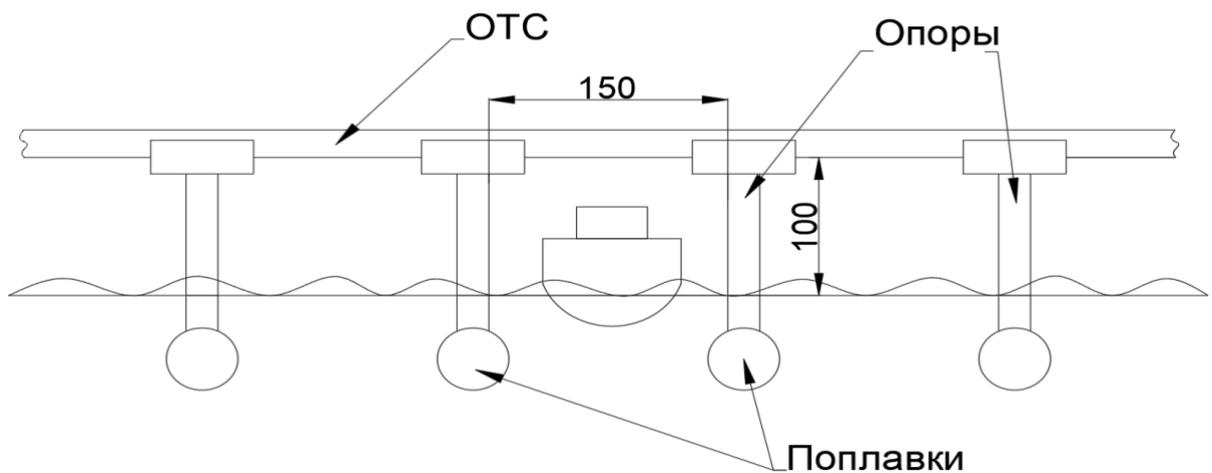


Рисунок 4 – Схема габаритных размеров коридора проезда судов (вариант)

Сила тяжести – один из важнейших негативных факторов, ограничивающих длину пролётов между опорами и материалоемкость

сечения эстакады. 100-метровые железобетонные опоры, поднятые над поверхностью воды и удерживающие при этом эстакаду, сами по себе имеют огромный вес согласно [2] – 28 000 тонн без учёта веса пролётной части. Данный параметр накладывает существенные ограничения на конструкцию и универсальность габаритов приближения, предписывая делать зоны проезда крупных судов отдельно, единичными. Значит, опоры и пролётные строения приоритетно выполнять из стали, сплавов алюминия или конструкционных композитов, при этом они должны весить на два порядка меньше.

Следует учесть, что обильные дожди в экваториальной зоне значительно повлияют на конструктив эстакады. При проектировании необходимо заложить особые требования к герметичности, а также к недопустимости наличия элементов, позволяющих накапливать и задерживать осадки.

В связи с обязательным обеспечением повышенной безопасности и надёжности эстакадных сооружений (не менее 99,5 %) защита от молний должна исключить прямое попадание разряда, а также электростатическую и магнитную индукцию. Особенно важно выделить фактор заноса наведённых молнией высоких электрических потенциалов.

### **3.3. Эстакада, расположенная ниже уровня воды**

Плавучая эстакада, расположенная ниже уровня воды, представляет собой плавучий тоннель. Данный тип сооружения – новая концепция, она рассмотрена во многих проектах, однако нигде пока не реализована [23]. Конструкция должна быть достаточно прочной и жёсткой, чтобы выдерживать внешние воздействия, эксплуатационные и случайные нагрузки.

Физическим ограничением пересечения сооружения судами является максимальная глубина осадки судна *Pioneering Spirit*, составляющая 27 м (с учётом динамики во время штормов и 10-процентного зазора безопасности). Оптимальная глубина размещения плавучего тоннеля – 50 м (рисунок 5).

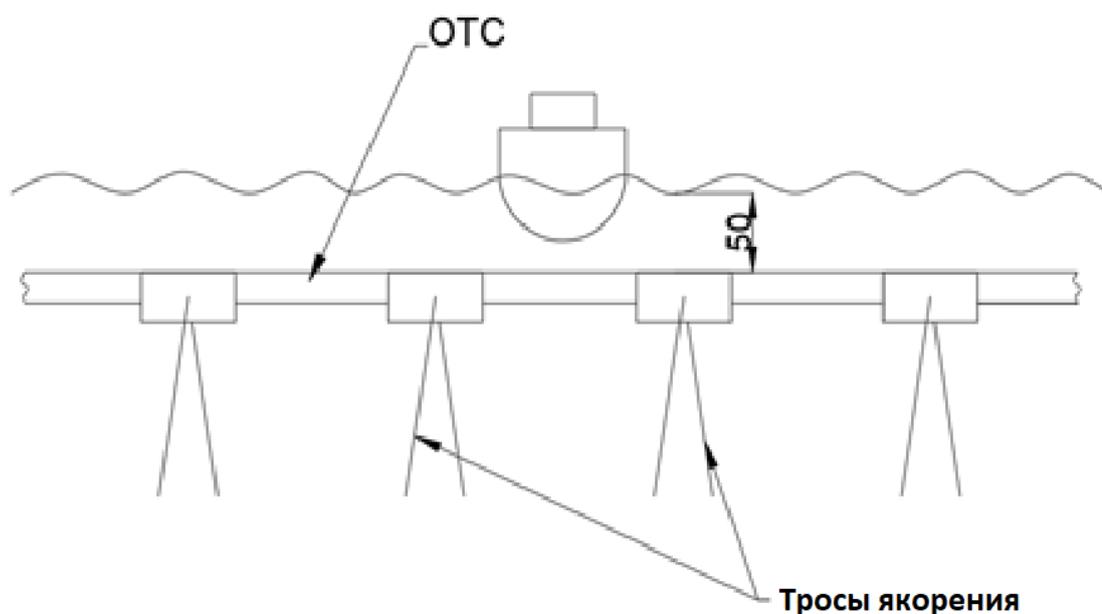


Рисунок 5 – Схема габаритных размеров коридора проезда судов (вариант)

Для того чтобы управлять поведением тоннеля (тем самым поддерживая необходимый избыточный уровень плавучести), в конструкции предусмотрены балансирующие ёмкости для регулирования изменяемой со временем плавучести эстакады. Статичное положение эстакады обеспечивают канаты якорения, которые всегда будут натянуты избыточной плавучестью поплавков эстакады. Для повышения линейной жёсткости наклонных канатов и исключения провиса в воде они должны быть выполнены с нулевой плавучестью.

### 3.4. Сравнение вариантов исполнений опорной эстакады

В таблице 2 представлены варианты исполнения опорной эстакады, а также показан уровень влияния природных факторов на её конструктив.

Таблица 2 – Сводная таблица влияния природных факторов на плавучие эстакады (– – фактор не влияет; + – фактор влияет; ++ – фактор существенно влияет)

| Фактор        | Влияние фактора на тип исполнения эстакады |                  |                  |
|---------------|--|------------------|------------------|
|               | На поверхности                             | Над поверхностью | Под водой (50 м) |
| 1             | 2  | 3                | 4                |
| Геометрия дна | –  | –                | –                |

Продолжение таблицы 2

| 1                                   | 2  | 3  | 4 |
|-------------------------------------|----|----|---|
| Цунами                              | +  | +  | – |
| Температурные воздействия воздуха   | +  | +  | – |
| Температурные воздействия воды      | +  | +  | + |
| Солёность воды                      | +  | +  | + |
| Течение                             | +  | +  | + |
| Волны                               | +  | +  | – |
| Осадки                              | +  | +  | – |
| Грозы                               | +  | +  | – |
| Ветер                               | +  | +  | – |
| Давление                            | +  | +  | + |
| Обрастание моллюсками и водорослями | +  | +  | + |
| Сила тяжести                        | +  | ++ | – |
| Видимость                           | +  | +  | – |
| Итого                               | 13 | 14 | 5 |

Проанализировав перечень факторов, воздействующих на надводные и подводную эстакады, можно сделать вывод, что подводное расположение конструктивно менее ресурсоёмко, более технологично и, как следствие, экономически выгоднее. Данный вариант исполнения не требует затрат на материалоемкие опоры подводной и надводной частей, подверженные гравитационным силам, динамическим воздействиям ветров и волн, а также исключит тепловые деформации элементов. Кроме этого, защитит сооружение от негативного воздействия осадков и молний. Соответственно, дальнейший обзор целесообразно проводить для подводной плавучей эстакады.

#### **4. Основные элементы и конструктивные особенности плавучей подводной эстакады**

Перечень компонентов подводного участка плавучей эстакады [3]:

- элементы анкерения – якоря, понтоны, опорные узлы;
- форвакуумные транспортные тоннели в двух направлениях;
- зоны посадки/высадки пассажиров и обслуживающего персонала;
- производственные и коммунальные тоннели;

- жилые блок-станции;
- транспортные средства;
- опорные элементы общепланетарного транспортного средства для его подводного размещения.

#### **4.1. Конструкция эстакады**

Конструкция эстакады должна вмещать все элементы сооружения, обеспечивать максимальную длину пролётов, при этом быть жёсткой и прочной, универсальной и экономичной (с учётом протяжённости).

Для обеспечения равномерности восприятия эстакадой нагрузок от глубинного давления, а также для уменьшения площади поверхности, подверженной коррозии и обрастанию моллюсками, сооружение предпочтительно делать круглого, трубного сечения. Такое решение позволит устранить турбулентность продольных водяных потоков, вызванных течением, и перепады давлений на границах горизонтальных и вертикальных поверхностей (как при коробчатой форме конструкции, предложенной в [2]). Кроме этого, отсутствие горизонтальных поверхностей не даст водорослям и моллюскам зацепиться за поверхность, снижая интенсивность биообрастания.

Плавающая эстакада – это сооружение, постоянно находящееся в воде. Соотношение между плавучестью и собственным весом очень важно, так как оно контролирует статическое поведение поплавка-тоннеля. Учитывая периодические взлёты ОТС, необходимо компенсировать вес транспортной системы балансирующими грузами, в качестве которых лучше всего применять морскую воду, закаченную в специальные каналы. В момент возвращения ОТС эти полости продуваются, сохраняя требуемый уровень плавучести. Как альтернатива, для того чтобы взлёт или посадка ОТС не оказали влияния на плавучесть подводной эстакады – выполнить ОТС с грузом, обладающим нулевой плавучестью.

Согласно [24] вес одного из вариантов исполнения ОТС составляет 1150 кг на погонный метр, плюс 250 кг (вес груза) и 25 кг (вес пассажира). Для обеспечения нулевой плавучести тоннеля подбирается соотношение веса сечения тоннеля, равное весу вытесненной воды.

На рисунке 6 представлено рекомендуемое компоновочное решение посадочной станции. Геометрически схема разделена на четыре функциональные зоны – две части предназначены для движения форвакуумных гиперскоростных транспортных средств в разных направлениях; две части отведены для посадки/высадки пассажиров. По горизонтальной оси сечения расположены две цилиндрические балластные ёмкости диаметром 1 м. В случае их заполнения морской водой вес погонного метра эстакады увеличивается на 1600 кг, что соответствует весу погонного метра загруженного ОТС с 10-процентным запасом при надводном нахождении ОТС. При подводном стартовом расположении ОТС и его выполнении с нулевой плавучестью размер балластных емкостей можно уменьшить.

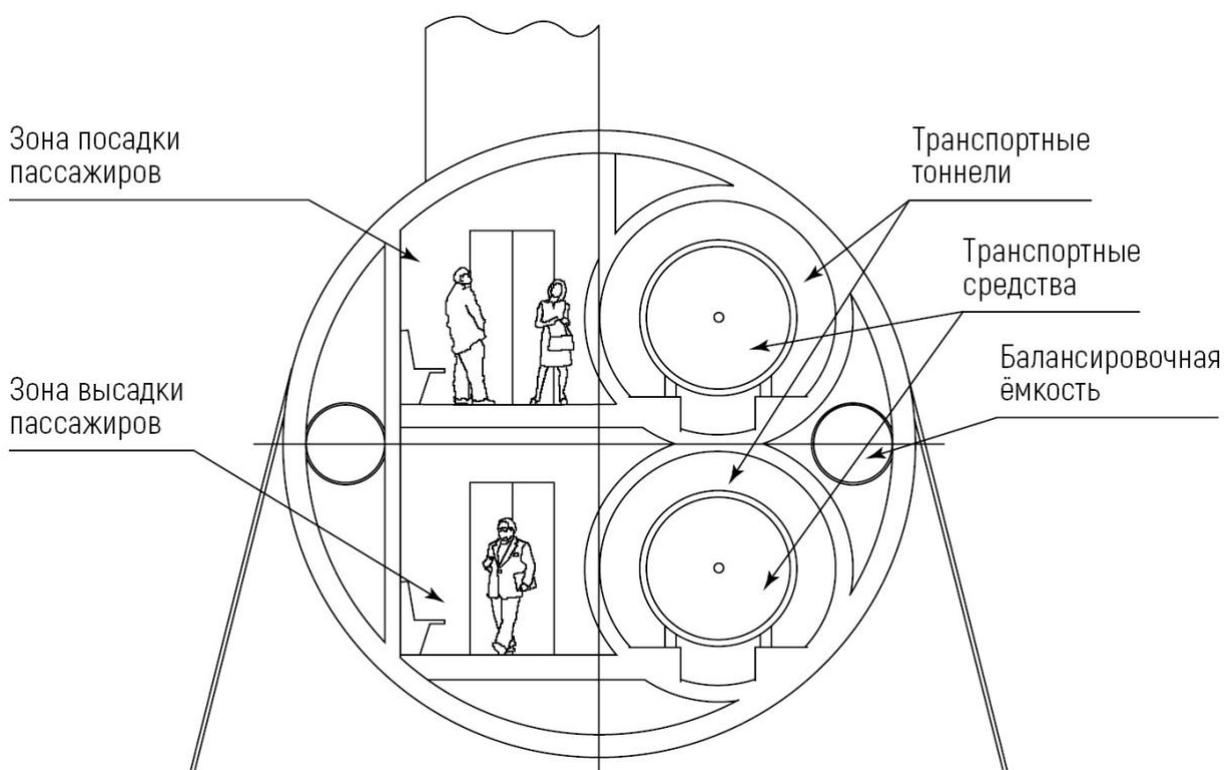


Рисунок 6 – Вариант компоновочного решения плавучей эстакады в зоне посадочной станции

Изображённый вариант компоновочного решения имеет внешний диаметр 9 м. При средней плотности морской воды в экваториальной зоне  $1020 \text{ кг/м}^3$  вес погонного метра конструкции должен быть равен  $64\,850 \text{ кг}$ , что соответствует весу вытесненной воды. При использовании бетона плотностью  $2500 \text{ кг/м}^3$  в качестве основного конструкционного материала приведённая площадь сечения составит  $26 \text{ м}^2$ .

Поскольку тоннель расположен на глубине порядка 50 м, важно, чтобы он обладал абсолютной водонепроницаемостью и сверхустойчивостью к воздействию солёной морской воды. Кроме того, тоннель необходимо надёжно защитить от направленных на него гидростатических и гидродинамических сил (например, он должен выдержать столкновение с китом или подводной лодкой).

Оболочка эстакады сделана из четырёх слоёв. Внешний слой выполнен из коррозионностойких сплавов, для того чтобы противостоять солёной морской воде и обрастанию моллюсками. Второй и третий слои изготавливаются из вспененных материалов, обеспечивающих упругую зону деформации тоннеля от внешних ударных нагрузок. Четвёртый слой – из железобетона, который даёт требуемые тоннелю прочность и вес, а также является основным конструктивным элементом внутренних компонентов. Схема строения оболочки корпуса тоннеля приведена на рисунке 7.

Коррозионностойкий сплав

Пеноматериалы

Железобетон

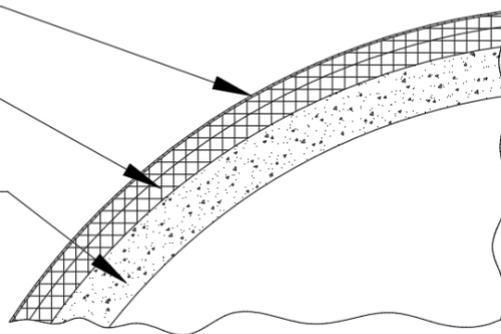


Рисунок 7 – Схема корпуса тоннеля (вариант)

Ввод в конструкцию продольного водного продуктопровода диаметром 1,5 м (на рисунке не показан) позволит уменьшить количество бетона в сечении на 1800 кг и сможет обеспечить всё ОТС пресной водой (в том числе для доставки на орбиту, а излишки – в регионы вдоль экватора). Так как линия строительства эстакады проходит через устье р. Амазонки, которая ежегодно сбрасывает в Атлантический океан 6300 км<sup>3</sup> пресной воды [20], не понадобится строительство дополнительных сооружений и заводов для опреснения солёной воды. Как предложено в [25], пресная вода извлекается из бассейна р. Амазонки после того, как она уже достигла океана. Важный фактор – пресная вода может добываться непосредственно с поверхности океана в 1–2 км от побережья Бразилии. Данная возможность позволит на законных основаниях исключить жалобы на разрушительную деградацию бассейна р. Амазонки в результате строительства эстакады и не создаст осложнений для судоходства по внутренним водным путям из-за размещения заборных станций. Гидрографические исследования показали [26], что пресноводный шлейф р. Амазонки над континентальным океаническим шельфом имеет толщину 3–10 м и ширину около 80 км.

Траекторию расположения подводной эстакады необходимо отметить на всех картах и внести во все электронные навигационные базы данных. На поверхности океанов вдоль плавучей эстакады должны быть размещены световые и акустические сигнальные буи.

#### **4.2. Система фиксации (якорения) плавучей эстакады к морскому дну**

Сложная геометрия дна вынуждает комбинировать участки, зафиксированные с помощью якорения, и участки, закреплённые плавучими понтонами, что приведёт к использованию как положительной, так и отрицательной плавучести. При положительной плавучести эстакада фиксируется на месте путём закрепления или посредством натяжных опор (тросов) на дне. При отрицательной – сооружение фиксируется на месте с помощью понтонов на поверхности воды или опор, установленных на дне.

Существуют следующие типы анкерения:

– якорение снизу канатами. Данный тип основан на принципе перевернутого маятника. Труба в месте крепления имеет специальный, стремящийся всплыть поплавков, однако удерживаемый на месте канатами, ослабление которых при таком якорении не допускается. Привязи могут располагаться вертикально. Указанный тип подходит для участков с течением, направленным вдоль трубы. Комбинированное расположение (вертикально и/или наклонно) применимо в местах с поперечным течением;

– поддержка трубы понтонами. Труба выступает как груз, утяжеляющий и удерживающий плавучий элемент. Система не зависит от глубины воды, в то же время чувствительна к ветру, волнам, течениям и возможному столкновению судов. Для компенсации от перемещений под действием внешних сил необходимы дополнительные устройства;

– эстакада на опорах (колоннах). Сооружение подобно «подводному мосту». Опоры могут находиться как в сжатом, так и растянутом состоянии. Глубина играет ключевую роль, допустимый её предел – до 100 м.

Конструкция должна быть такой, чтобы в случае потери одного из элементов анкерения обеспечивалось сохранение работоспособности всей системы, что достигается дублированием и резервированием.

Основные типы анкерения изображены на рисунке 8.

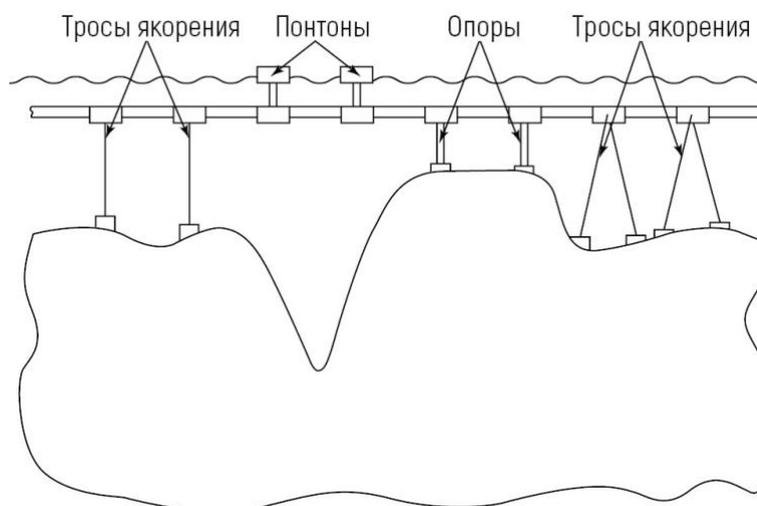


Рисунок 8 – Схема основных типов анкерения плавучего тоннеля

Поскольку тоннель проходит через Атлантический, Индийский и Тихий океаны, он столкнётся с высокими скоростями течений. Тоннель не должен отклоняться от потока воды, сохраняя геометрическую форму и траекторию. Следовательно, предлагается его закрепление на морском дне посредством стальных канатов с якорями-анкерами [3]. Шаг и прочность элементов анкерения необходимо оценить индивидуально для каждого региона, исходя из местных особенностей, а также внешних и внутренних сил, суммарно действующих на эстакаду.

Плавающая эстакада будет располагаться ниже поверхностных волн и вне зоны ветрового давления, поэтому для элементов анкерения основной нагрузкой станет противостояние устойчивым океанским течениям. Однако они не являются самыми серьёзными нагрузками, воспринимаемыми якорями, – более опасны вертикальные глубинные волны, возникающие из-за перемешивания водных масс (в том числе редкие волны цунами). На сооружение не должны оказывать динамическое влияние проплывающие суда даже в случае глубокой посадки кораблей. В то же время не следует эстакаду чрезмерно углублять, иначе её обслуживание будет сложным и дорогостоящим. Авторами рекомендована глубина расположения 45–60 м. На данное расстояние допускается погружение с аквалангами (согласно [27] нижний предел технического дайвинга – 60 м). Исследования [28] также показали, что на глубине 100 м и более геомагнитные возмущения могут влиять на погруженные в воду кабели и металлические трубопроводы, что необходимо учитывать при проектировании эстакады.

Глубоководные якоря широко применяются в нефтяных платформах. Они представляют собой многотонный бетонный блок, надёжно закреплённый натянутыми стальными канатами. В воде достижимая скорость свободного падения или конечная скорость сброшенных за борт торпедообразных якорей почти полностью определяется равновесием плавучего и гидродинамического сопротивления. Проведены полевые испытания [29], чтобы подтвердить осуществимость подводного захоронения

ядерных отходов, инкапсулированных в свободно падающем пенале массой 2000 кг. При динамической стабилизации после разгона он движется вниз с постоянной скоростью почти 45 м/с до касания с морским дном, затем в силу своего собственного импульса проникает и закапывается в подводный грунт. Доказано, что обтекаемая торпеда из стального корпуса может легко прорваться на 40 м вглубь кажущейся твёрдой поверхности дна океана [30].

Якорь действует подобно свае, за счёт сил трения удерживаемой на месте. Количество якорей для каждой точки анкерения должно быть рассчитано таким образом, чтобы исключить перемещение плавучей эстакады от воздействия внешних сил. Одним из преимуществ применения глубоководных якорей является использование теоретически неограниченного их количества, а также возможность без последствий «сбросить якорь», освобождая крепления канатов в случае землетрясения или критического расхождения плит земной коры.

### **4.3. Энергообеспечение подводной плавучей эстакады**

Энергообеспечение плавучей эстакады условно можно разделить на две зоны:

1) внутренние источники потребления – движение транспорта, освещение, кондиционирование, работа насосного оборудования и систем управления, др.;

2) внешние источники потребления – сигнальные маяки, буи оповещения, радары, системы безопасности и связи.

Существуют различные возможные источники энергии, однако мировые тенденции и экологическая направленность проекта призывают к применению возобновляемых источников энергии. Потребление энергии Солнца и ветра – очевидное решение, так как экваториальный регион славится стабильностью солнечного света и направленными ветрами. Тем не менее самый эффективный способ – использование природных океанических течений. Они не зависят от времени суток, положения Солнца или поры года.

Гидротурбины подводных электростанций, функционирующие на основе энергии течений, могут быть установлены отдельно или непосредственно на поплавках-тоннелях эстакады ОТС.

Течения в экваториальной зоне в основном направлены вдоль эстакады (85–90 %). Их скорость в Тихом и Атлантическом океанах составляет 1 м/с; Индийском – 2,8 м/с. Энергия может быть получена с помощью подводных турбин в процессе гидродинамического подъёма или сопротивления. Данные турбины имеют лопасти ротора, генератор для преобразования энергии вращения в электричество и средство для передачи электрического тока потребителю. Начальная оценка мощности одной турбины  $P_t$  (Вт), которую можно извлечь из водяного потока, определяется по формуле (2):

$$P_t = \frac{1}{2} C_p S \rho V^3; \quad (2)$$

где  $C_p$  – безразмерный коэффициент полезного действия турбины (современные турбины достигают значения  $C_p = 0,4–0,5$ );

$S$  (м<sup>2</sup>) – рабочая площадь поверхности турбины;

$\rho$  (кг/м<sup>3</sup>) – плотность морской воды;

$V$  (м/с) – скорость течения.

Данный способ получения энергии даёт на каждый 1 м<sup>2</sup> рабочей площади турбины  $P_{t1} = 230$  Вт для Атлантического и Тихого океанов;  $P_{t1} = 5040$  Вт – для Индийского океана.

## **5. Выводы и дальнейшие направления исследования**

Плавающая эстакада является взлётно-посадочной площадкой для ОТС и неотъемлемым элементом наземного перевозочного процесса для реализации КИО «Орбита». Она позволяет организовать процессы логистики вдоль экватора, а также равномерное распределение грузов и пассажиров вдоль ОТС. Погружённое на глубину 50 м сооружение подвержено минимальному количеству негативных воздействий, поэтому безопаснее. К тому же оно конструктивно менее материалоемкое, чем надводное, и, соответственно, будет иметь значительно более низкую стоимость. Встроенные

продуктопроводы также обеспечат КИО «Орбита» пресной водой и позволят размещать подводные турбины для энергопитания всего комплекса (при незначительном дополнительном энергопотреблении).

Направление дальнейшей работы – исследование сечения трубы с детальным её расчётом. Будут учтены скорости подводных течений, материал- и трудоёмкость изготовления, проработана технология строительства и монтажа, а также устойчивость к вандализму (не только со стороны людей, но и морских животных) и терроризму. При этом отдельное внимание необходимо уделить изучению проблемы биообрастания для обеспечения требуемой чистоты подводной эстакады.

#### **Список основных источников**

1. Циолковский, К.Э. Исследование мировых пространств реактивными приборами (1911–1912 гг.): избранные труды / К.Э. Циолковский. – М.: АН СССР, 1962. – 536 с.: ил.

2. Кривко, О.П., Логвинов, Г.Ф. Анализ вариантов конструкции эстакады ОТС; под общ. рук. А.Э. Юницкого. – Гомель: Центр «Звёздный мир», 1989. – 118 с.: ил.

3. Unitsky, A. String Transport Systems: On Earth and in Space / A. Unitsky. – Silakrogs, PNB Print, 2019. – 560 p.

4. Honnorez, J. Mapping of a Segment of the Romanche Fracture Zone: A Morphostructural Analysis of a Major Transform Fault of the Equatorial Atlantic Ocean / J. Honnorez [et al.] // *Geology*. – 1991. – Vol. 19, No. 8. – P. 795–798.

5. Smith, C.R. The Deep Pacific Ocean Floor / C.R. Smith, A.W. Demopoulos // *Ecosystems of the World*. – 2003. – Vol. 28. – P. 179–218.

6. Data, E.C. Macapa Climate Data [Electronic resource]. – 2020. – Mode of access: <https://en.climate-data.org/south-america/brazil/amapa/macapa-4065/>. – Date of access: 20.06.2020.

7. Data, E.C. Pontianak Climate Data. [Electronic resource]. – 2020. – Mode of access: <https://en.climate-data.org/asia/indonesia/west-kalimantan/pontianak-4810/>. – Date of access: 20.06.2020.

8. Godfrey, J. The Heat Budget of the Equatorial Western Pacific Surface Mixed Layer / J. Godfrey, E. Lindstrom // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 1989. – Vol. 94, No. C6. – P. 8007–8017.

9. Еловичева, Я.К. Физическая география Мирового океана: курс лекций / Я.К. Еловичева. – Минск: БГУ, 2006. – 196 с.: ил.

10. Гилл, А. Динамика атмосферы и океана / А. Гилл. – М.: Академкнига, 1986. – 550 с.: ил.

11. Martin, D.W. Three Years of Rainfall over the Indian Ocean / D.W. Martin, B.B. Hinton, B.A. Auvine // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 1993. – Vol. 74, No. 4. – P. 581–590.

12. Arguez, A. NOAA's 1981–2010 US Climate Normals: an Overview / A. Arguez [et al.] // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 2012. – Vol. 93, No. 11. – P. 1687–1697.

13. Lejars, M. Fouling Release Coatings: A Nontoxic Alternative to Biocidal Antifouling Coatings / M. Lejars, A. Margailan, C. Bressy // *Chemical Reviews*. – 2012. – Vol. 112, No. 8. – P. 4347–4390.

14. Terlizzi, A. Environmental Impact of Antifouling Technologies: State of the Art and Perspectives / A. Terlizzi [et al.] // *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*. – 2001. – Vol. 11, No. 4. – P. 311–317.

15. Palraj, S. Biofouling and Corrosion Characteristics of 60/40 Brass in Mandapam Waters / S. Palraj, G. Venkatachari, G. Subramanian // *Anti-Corrosion Methods and Materials*. – 2002. – Vol. 43, No. 9. – P. 194–198.

16. Marszalek, D.S. Influence of Substrate Composition on Marine Microfouling / D.S. Marszalek, S.M. Gerchakov, L.R. Udey // *Applied and Environmental Microbiology*. – 1979. – Vol. 38, No. 5. – P. 987–995.

17. Daniel, G. Copper Immobilization in Fouling Diatoms / G. Daniel, A. Chamberlain // *Botanica Marina*. – 1981. – No. 24. – P. 229–243.

18. Radar, S. Ships Movement Live Map [Electronic resource]. – 2020. – Mode of access: <https://www.ships.com.ua/>. – Date of access: 25.06.2020.
19. Brochure Pioneering Spirit, in Reference [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.vulkan.com/en-us/couplings/Documents/Couplings%20Reference%20Brochure%20Pioneering%20Spirit.pdf>. – Date of access: 20.06.2020.
20. The Impact of Mega-Ships [Electronic resource]. – 2015. – Mode of access: [https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/15cspa\\_mega-ships.pdf](https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/15cspa_mega-ships.pdf). – Date of access: 20.06.2020.
21. Gordon, A.L. Thermocline and Intermediate Water Communication Between the South Atlantic and Indian Oceans / A.L. Gordon [et al.] // *Journal of Geophysical Research*. – 1992. – Vol. 97, No. C5. – P. 7223–7240.
22. Александров, А.А. Справочник по управлению кораблём / А. Александров. – М.: Воениздат, 1974. – 509 с.: ил.
23. Simovic, M. Floating Solutions: The New Meaning of Mobility / M. Simovic, S. Krasic, M. Nikolic // *WCFS2019*. – Singapore: Springer Singapore, 2020. – P. 411–426.
24. Non-Rocket Space Industrialization: Problems, Ideas, Profects: Materials of the II Intern. Scient. and Techn. Conf., Maryina Gorka, 21 June 2019 / *Astroengineering Technologies*; under total. ed. A. Unitsky. – Minsk: Paradox, 2019. – 240 p.
25. Badescu, V. Transatlantic Freshwater Aqueduct / V. Badescu, D. Isvoranu, R.B. Cathcart // *Water Resources Management*. – 2010. – Vol. 24, No. 8. – P. 1645–1675.
26. Nikiema, O. Numerical Modeling of the Amazon River Plume / O. Nikiema, J.L. Devenon, M. Baklouti // *Continental Shelf Research*. – 2007. – Vol. 27, No. 7. – P. 873–899.
27. Lafay, V. ECG Changes During the Experimental Human Dive HYDRA 10 (71 atm/7,200 kPa) / V. Lafay [et al.] // *Undersea & Hyperbaric Medicine*. – 1995. – Vol. 22, No. 1. – P. 51–60.

28. Boteler, D. Magnetic and Electric Fields Produced in the Sea During Geomagnetic Disturbances / D. Boteler, R. Pirjola // Pure and Applied Geophysics. – 2003. – Vol. 160, No. 9. – P. 1695–1716.

29. Xiao, H. Numerical Simulation and Experiments of a Probe Descending in the Sea / H. Xiao, C. Liu, J. Tao // Ocean Engineering. – 2006. – Vol. 33, No. 10. – P. 1343–1353.

30. Colliat, J. Anchors for Deepwater to Ultradeepwater Moorings / J. Colliat // Offshore Techn. Conf., Houston, 6–9 May 2002 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.onepetro.org/conference-paper/OTC-14306-MS>. – Date of access: 20.06.2020.