

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Строительные конструкции и транспортные системы

УДК [UDC] 624.014.2: 625.41:656.21

DOI 10.17816/transsyst20239144-63

© Н.А. Сенькин, Д.М. Андреев, В.С. Васильев

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет  
(Санкт-Петербург, Россия)

## ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО СОЗДАНИЮ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ: КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ

В рамках студенческих исследований в Санкт-Петербургском архитектурно-строительном университете продолжается разработка альтернативных предложений по созданию высокоскоростной магистрали в Арктической зоне вдоль Северного Морского Пути с остановками в основных транспортно-логистических центрах по побережью страны. Магистраль берет свое начало в Северо-Западном регионе России, в морском порту Усть-Луга, проходит по Ленинградской области, Заполярному региону Европейской части и Сибири и через Берингов пролив заканчивается на Аляске, соединяя собой два континента. В статье представлены результаты научно-исследовательских работ по прокладке схемы транспортной магистрали, по ее структуре и архитектурной компоновке зданий транспортно-пересадочных узлов. Также приведены результаты модельного эксперимента по исследованию конструктивной и расчетной схем каркаса здания с кольцевым пандусом.

**Обоснование:** в настоящих условиях Северный Морской Путь (СМП) представляет особый интерес для развития данного арктического транспортного направления. В августе 2022 года правительство утвердило план развития СМП до 2035 года. План включает в себя 150 мероприятий, которые входят в пять ключевых разделов, включая транспортную и электроэнергетическую инфраструктуру. В настоящий момент уровни транспортной доступности и инфраструктуры данного региона находятся на недостаточном уровне для эффективного использования полного потенциала Заполярной территории. Для обеспечения надежного функционирования СМП требуется создать дополнительную грузопассажирскую систему, характеризующуюся движением грузовых модулей со скоростью до 200 км/ч и пассажирских модулей – до 500–1000 км/ч. Проектируемая магистраль позволит соединить ключевые транспортно-логистические морские центры и в кратчайшие сроки доставлять пассажиров и грузы.

**Цель:** разработка высокоскоростной транспортной магистрали в Арктической зоне, построенной на широком применении электротранспорта.

**Материалы и методы:** построен маршрут магистрали, рассчитаны эстакадные конструкции на сочетания действующих нагрузок, сил и воздействий, включая учет динамических аспектов и нелинейности, с использованием программных комплексов "SCAD Office" и "Lira".

**Результаты:** по предварительным технико-экономическим показателям продолжительность доставки грузов по Арктической скоростной магистрали до Берингова пролива по сравнению с СМП сокращается в 5,5 раза, а пассажиров – почти в 30 раз, но при этом протяженность проектируемой скоростной магистрали почти

в 1,6 раза выше в связи с необходимостью обхода высоких прибрежных горных массивов, особенно в шельфе Восточно-Сибирского моря.

**Заключение:** при проектировании глобальной сухопутной транспортной сети данные исследования подтверждают возможность использования технологий Evacuated Tube Transportation и Маглев для Арктической скоростной транспортной магистрали. В дальнейших исследованиях будут рассмотрены подводные трубные магистрали, которые должны иметь протяженные прямолинейные участки длиной более 1000 км, обходящие прибрежные горные массивы и обеспечивающие минимизацию количества транспортно-пересадочных узлов.

**Ключевые слова:** высокоскоростная транспортная магистраль, эстакада из труб большого диаметра, магнитно-левитационная подушка, пониженное давление в трубах, вантовые и арочные конструкции.

## Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

Field – Building constructions & transport systems

© N.A. Senkin, D.M. Andreev, V.S. Vasilev

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

(St. Petersburg, Russia)

# PROPOSALS FOR THE CREATION OF HIGH-SPEED TRANSPORT HIGHWAYS IN THE ARCTIC ZONE: CONSTRUCTIONS AND TECHNOLOGIES

**Aim:** development of a high-speed transport highway in the Arctic zone, built on the widespread use of electric transport.

**Materials and Methods:** the trestle structures are designed for combinations of operating loads, forces and impacts, including consideration of dynamic aspects and nonlinearity, using the SCAD Office software package.

**Results:** according to preliminary technical and economic indicators, the duration of cargo delivery along the Arctic Expressway to the Bering Strait is reduced by 5.5 times compared to the Northern Sea Route (NSR), and passengers by almost 30 times, but at the same time the length of the projected expressway is almost 1.6 times higher due to the need to bypass high coastal mountain ranges.

**Conclusion:** when designing a global land transport network, these studies confirm the possibility of using Evacuated Tube Transportation and Maglev technologies for the Arctic High-speed Transport Highway. In further studies, underwater pipelines will be considered, which will have long straight sections with a length of more than 1000 km, bypassing coastal mountain ranges and minimizing the number of transport hubs.

**Keywords:** high-speed transport highway, beam-overpass of large diameter pipes, magnetic levitation cushion, low pressure in the pipes, cable-stayed and arched structures.

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из самых грандиозных проектов нашего новейшего времени является создание трансконтинентальной высокоскоростной магистрали через Берингов пролив.

Еще в начале XX века Российский Царь Николай Александрович Романов высочайше одобрил предложение о строительстве Сибирско-Аляскинской железной дороги от мыса Принца Уэльского на Аляске в Иркутск через туннель под Беринговым проливом через Верхнеколымск и Якутск. Но в связи с началом Первой Мировой войны проект был отменен.

24 апреля 2007 года в Москве состоялась Международная конференция «Трансконтинентальная Магистраль Евразия – Америка через Берингов пролив» [1], которая определила необходимость формирования единой глобальной сухопутной транспортной сети с целью обеспечения связи транспортных и энергетических систем Евразии и Америки. Предложено построить около 6 тыс. км железных дорог от Якутска до ближайшего узла североамериканской сети железных дорог через Магадан, Чукотку, Берингов пролив и Аляску в едином коридоре с линиями электропередачи и оптоволоконной связи. Техническая осуществимость такого проекта в настоящее время не вызывает сомнений у международного сообщества [1].

В марте 2015 года Президент РАН В.Е. Фортов (1946–2020) передал главе государства В. В. Путину четыре больших масштабных проекта, нацеленных на глобальное развитие страны, включая предложения по строительству скоростной железной дороги через Сибирь с выходом на Берингов пролив. Этот проект «Развитие», проект весьма затратный, но позволяющий решить многие проблемы по развитию огромного региона страны [2].

В Санкт-Петербургском государственном архитектурно-строительном университете (СПбГАСУ) в рамках студенческих научных исследований по теме «Инновационные предложения по созданию высокоскоростной транспортной системы Санкт-Петербурга», в частности, выполняются инициативные разработки альтернативных предложений по созданию окружной надземной высокоскоростной транспортной магистрали (ВСТМ) [3, 4]. Городские ВСТМ системы «Роса» проектируется на движение высокоскоростных пассажирских электропоездов с максимальной скоростью 500 км/ч, подлежащих разработке с применением технологий Маглев и ЕТТ (Evacuated Tube Transportation) [3–20]. Так в первой авторской статье под названием «К вопросу создания высокоскоростной транспортной магистрали в Санкт-Петербурге», опубликованной в электронном журнале «Транспортные системы и технологии» [3], разработана основная концепция ВСТМ «Роса»

и представлены результаты научно-исследовательских работ (НИР) за 2017–2019 гг. по вышеуказанной теме (Часть 1). Были разработаны: окружная «кольцевая» схема и технологическая система магистрали, жесткая главная балка путепровода, представляющая собой составную многотрубную конструкцию с рельсовым путем 1520 мм и пониженным внутренним давлением на скоростных участках в каждой трубе, составляющим 1/10 от нормального атмосферного. В области строительных конструкций выполнено вариантное проектирование вантово-стержневых систем с выбором основного арочно-вантового варианта эстакадной конструктивной схемы, обеспечивающего жесткую поддержку балки путепровода [3].

Во второй статье «Предложения по строительству эстакадных конструкций и транспортно-пересадочных узлов высокоскоростной магистрали в Санкт-Петербурге» [4] в продолжении данной темы представлены результаты НИР за 2019–2021 гг. (Часть 2), а именно: модернизация схемы прокладки транспортной магистрали; архитектурная компоновка зданий транспортно-пересадочных узлов (ТПУ); исследование предварительно-напряжения затяжек и вант на снижение основных усилий и деформаций элементов; расчеты конструкций наиболее высокого и нагруженного морского участка.

В настоящей статье по итогам исследований в 2021–2022 годах (Часть 3) выполнен анализ влияния наклона транспортной магистрали на внутренние усилия в элементах, исследования эстакадных конструкций и транспортно-пересадочных узлов высокоскоростной магистрали для применения на Арктических участках при скорости движения на грузовых путях до 160 км/ч и пассажирских – до 1000 км/ч.

## КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ВСТМ

Предложенная ранее ВСТМ [3, 4] обеспечивает удобные, быстрые и безопасные высокоскоростные транспортные связи мегаполиса с пригородами и близлежащими поселениями Ленинградской области. Такая магистраль относится к внеуличной сети, так как построена на высотных и большепролетных конструкциях на эстакадной основе, которые обеспечивают оптимальное преодоление естественных и искусственных преград, включая высотную высокоплотную застройку.

На Рис. 1 представлены конструктивно-технологические элементы или технологическая структура ВСТМ, обеспечивающая возможность ее функционирования на сложных площадках с перепадами высот  $H$  и уклонами  $i$ . Посредством указанных элементов обеспечивается работоспособность функциональных зон ВСТМ, характеризующихся как уровнем давления воздуха во внутренней полости транспортных труб (1/10 нормального давления воздуха) и соответствующим скоростным

режимом движения составов, так и возможностью для составов подниматься на более высокие отметки либо опускаться вниз, например в депо.

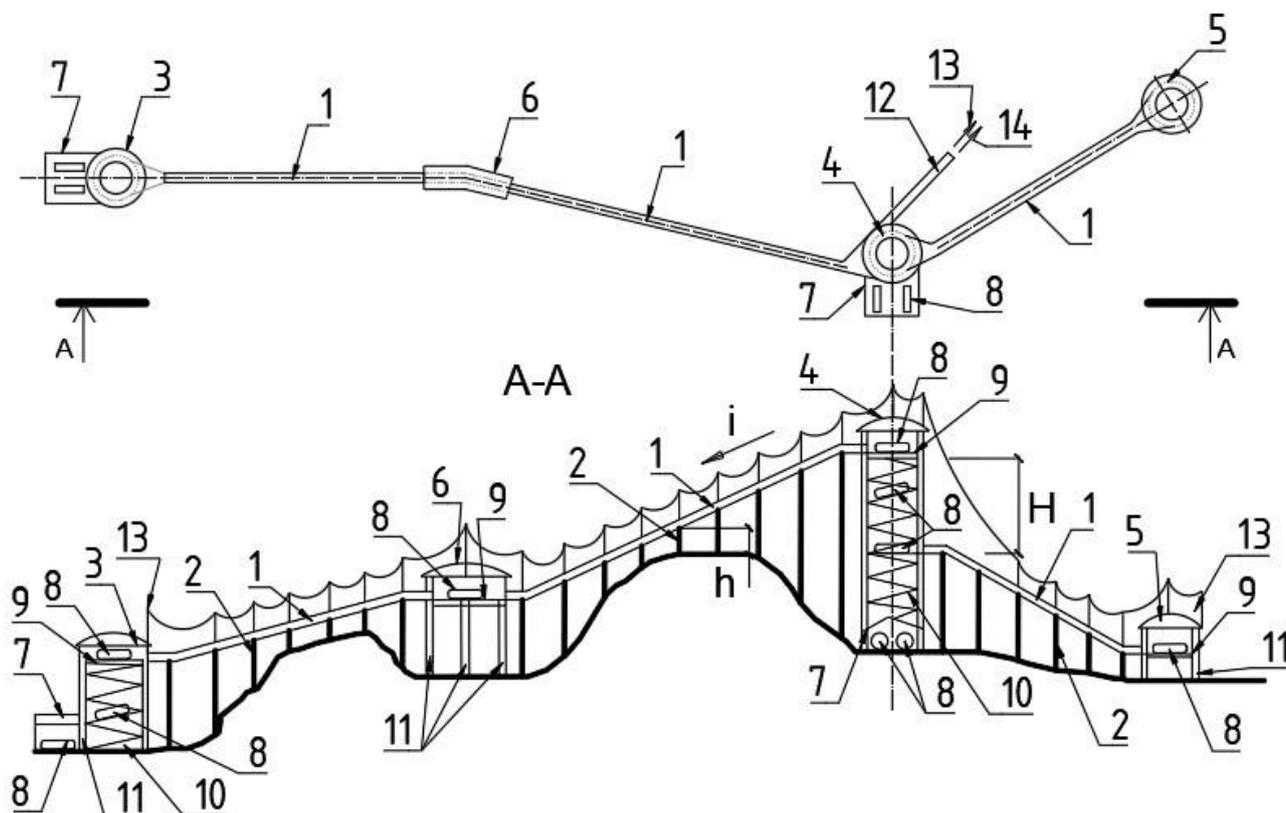


Рис. 1. Основная технологическая структура транспортно-энергетической магистрали:

- 1 – балка-путепровод;
- 2 – многопролетная эстакада;
- 3 – здание ТПУ с кольцевым пандусом, позволяющим подъем-спуск состава по вертикали при движении по спирали (вариант 1);
- 4 – то же, с Т-образным перекрестком (вариант 2);
- 5 – здание ТПУ с кольцевым перроном для разворота составов (вариант 3);
- 6 – то же, для поворота магистрали (вариант 4);
- 7 – здание депо;
- 8 – состав из транспортных модулей;
- 9 – перрон для посадки и высадки пассажиров;
- 10 – спиральный пандус;
- 11 – опорные колонны здания ТПУ с лестницами и лифтами;
- 12 – ответвление путепровода;
- 13 – воздушная линия электропередачи;
- 14 – кабельная линия электропередачи;
- $h$  – высота положения балки-путепровода относительно земной поверхности;
- $H$  – перепад высот по высоте между двумя положениями балки-путепровода магистрали

Главная балка выполнена четырехтрубной с рельсовым основанием в каждой трубе, отведенным под транспортные нужды, включая обратное

направление. Для высокоскоростных цилиндрических модулей с пассажирами используются две трубы, расположенные по горизонтали, а для движения скоростных цилиндрических модулей с грузом, например с полезными ископаемыми, - две трубы, расположенные по вертикали, с устройством специального прохода для ремонтного персонала (рис. 2). Как вариант, для городских и пригородных условий целесообразно построение поперечной схемы балки-путепровода с двумя трубами для маломобильных пассажиров при скорости движения до 100 км/ч.

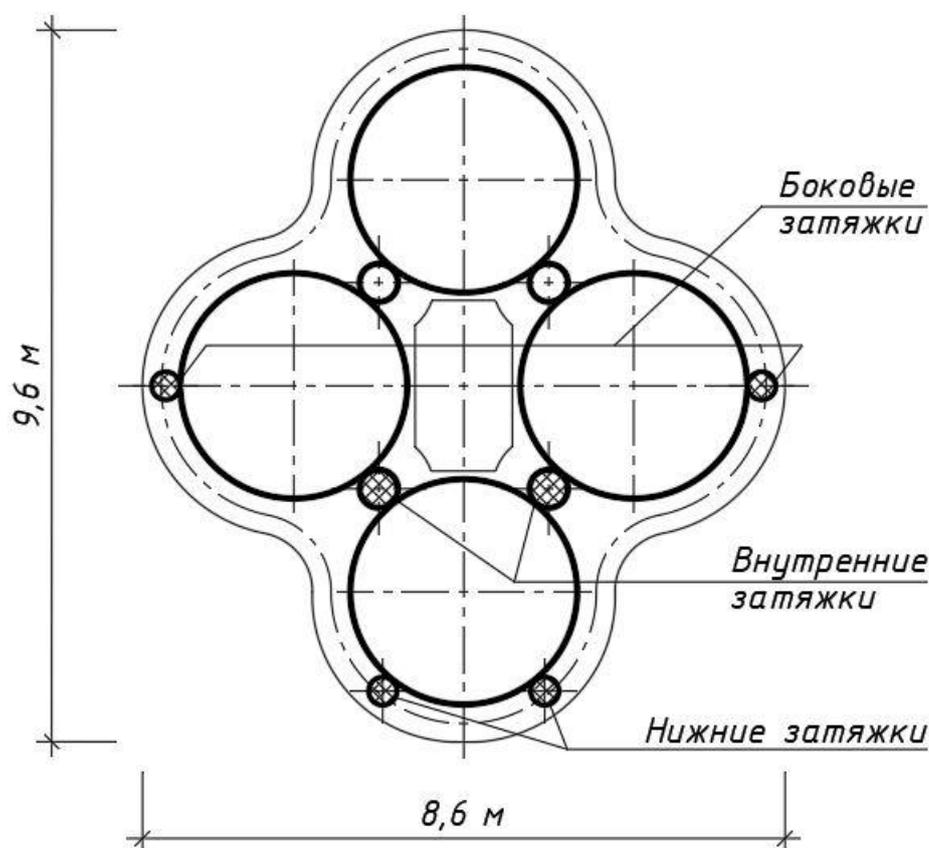


Рис. 2. Поперечное сечение балки-путепровода, усиленной предварительно-напряженными стальными канатами (затяжками), с центральным коридором

Конструктивно-технологическая схема ВСТМ на прямолинейном участке – перегоне между станциями ТПУ составлена из большепролетных арочно-вантовых эстакад пролетами 180 м и 360 м, обеспечивающих надежную и безопасную подвеску балки-путепровода. Процесс скоростного движения является равноускоренным с максимальным ускорением при движении пассажирских составов, составляющим  $a = 4,63 \text{ м/с}^2$  ( $0,47g$ ) в течение 0,5 мин (30 с). Здесь предельное значение ускорения (замедления) назначается не превышающим 50 % ( $0,5 g$ ) от

ускорения свободного падения  $g$ , что является допустимым для пассажирского транспорта. Поезд набирает максимальную скорость  $V_{max} = 500$  км/ч, но технология магнито-левитационной подушки с использованием пониженного давления в трубах позволяет достигать скорости 1000 км/ч и более. При движении на такой скорости достигается наименьшая продолжительность поездки, поэтому имеет смысл рассматривать более протяженные прямолинейные участки для обеспечения наибольшего времени движения на максимальной скорости.

Пассажирский состав общей длиной 88,0 м из 8 вагонов – модулей (общая вместимость 64 посадочных места в составе) внешне подобен скоростному поезду «Сапсан», но поперечный размер выполнен более узким, почти в 1,5 раза. Здесь обеспечен продольный проход с аварийными выходами в первом и последнем вагонах с двухрядной посадкой пассажиров. Цилиндрический транспортный модуль изготовлен на основе металлической трубы с продольным проходом и дверями типа «крылья чайки», которые поднимаются вверх при посадке – высадке.

Назначение г. Гатчина столицей Ленинградской области определило необходимость усовершенствования схема магистрали вокруг Санкт-Петербурга с добавлением нового участка ТПУ «Рыбацкое» – ТПУ «Павловск» – ТПУ «Татьянино» (Гатчина) (Рис. 3).



Рис. 3. Визуализация участка ВСТМ с ТПУ «Татьянино» (Гатчина) и интерьер перрона с пассажирским составом на разворотном кольце ТПУ «Татьянино»

Как правило, здания ТПУ имеют цилиндрическую форму исполнения и содержат в себе спиральные пандусы для спуска подвижных составов в обслуживающее депо на поверхности земли, например ТПУ «Рыбацкое» (Рис. 1, вариант 1). Ввиду стесненных условий промежуточная станция в Павловске выполнена в форме открытой книги по стандартной схеме без изменения высотного уровня путепровода магистрали, но обеспечивающая поворот направления движения поездов транспортной магистрали (Рис. 1, вариант 4). ТПУ «Татьянино» выполнено с платформой для посадки

пассажиров и стоянки составов в виде разворотного кольца (Рис. 1, вариант 3) по форме в виде гриба также в связи со стесненностью площадки.

Следует заметить, что местность от Павловска к г. Гатчина представляет собой весьма возвышенную территорию с отметками до 110,0 м выше Балтийского уровня (Рис. 4).

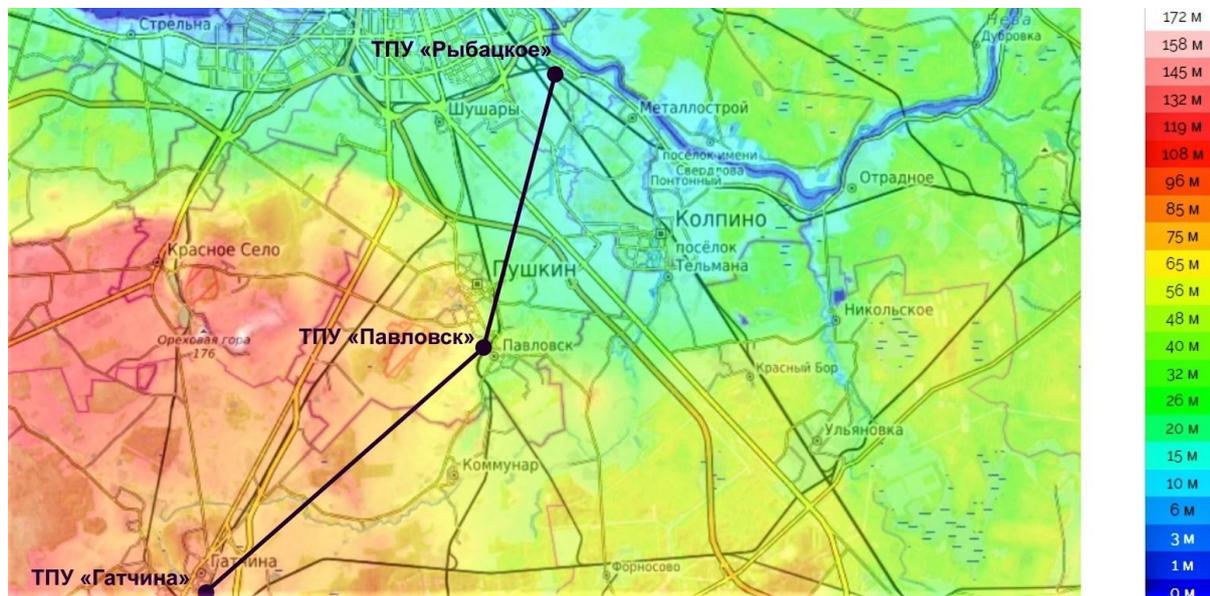


Рис. 4. Принципиальная схема магистрали на участке ТПУ «Рыбацкое» – ТПУ «Павловск» – ТПУ «Татьянино» (Гатчина) на физической карте с высотами местности

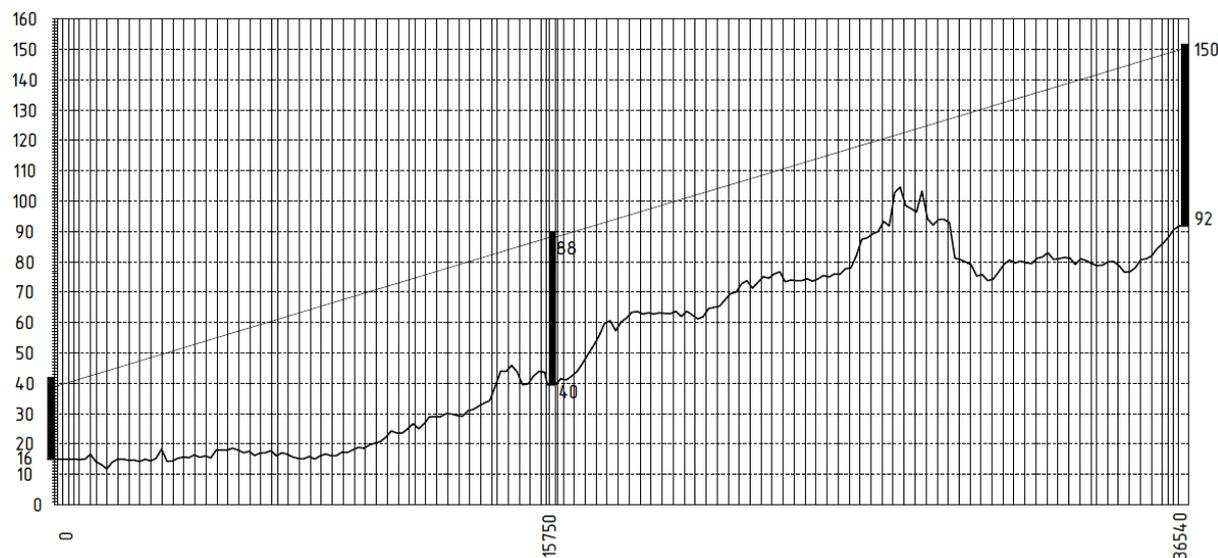


Рис. 5. Профиль рельефа местности магистрали на участке ТПУ «Рыбацкое» – ТПУ «Павловск» – ТПУ «Татьянино» (Гатчина) со зданиями ТПУ и осью путепровода с уклоном всего 3 ‰ (высоты и расстояния, в м)

Преодоление значительных вертикальных препятствий производится при учете допустимого продольного наклона путепровода в интервале 3–40 ‰ (промиле), принимаемого для водоотведения аналогично

нормативным требованиям п. 5.3.9 СП120 «Метрополитены» и преодоления высоких мест (Рис. 5).

В феврале 2022 года в Механической лаборатории СПбГАСУ имени профессора Н.Н. Аистова завершен модельный эксперимент для выяснения распределения усилий между элементами в сложных зданиях круговой формы. Целью эксперимента стало сравнение полученных результатов с теоретическими с подтверждением гипотезы о возможности расчета элементов кольцевого пандуса как кольцевых балок с жесткими опорами, что значительно упрощало понимание работы такой конструкции и ее проектирование. В процессе исследования принята модель ТПУ в масштабе 1:500 на основе первого варианта (Рис. 1), сваренная из стальных профилей коробчатого сечения размером 25x25x2 мм для стоек модели и 16x16x1 мм для балок пандуса (Рис. 6).



Рис. 6. Испытательная модельная установка для исследования каркаса транспортно-пересадочного узла с кольцевым пандусом, загружаемая весовой нагрузкой, с тензометрическими измерениями напряжений

Результаты эксперимента и расчета на ПК LIRA 10.8 показали отклонение в 10,7 % в сторону запаса прочности, чем подтвердили

возможность таких приближенных расчетов балок спирального пандуса как однопролетных балок с заземленными опорами (Рис. 7).

Эффективность работы высокоскоростной транспортной магистрали весьма высока. Так, при скорости 500 км/ч продолжительность переезда от ТПУ «Татьянино» до ТПУ «Рыбацкое» со станцией метро «Рыбацкое», составит не более 13 мин при расстоянии 39 км, а от ТПУ «Рыбацкое» до ТПУ «Кронштадт», расположенных на схеме ВСТМ диаметрально, с расстоянием 83,4 км всего за 27 мин [4].

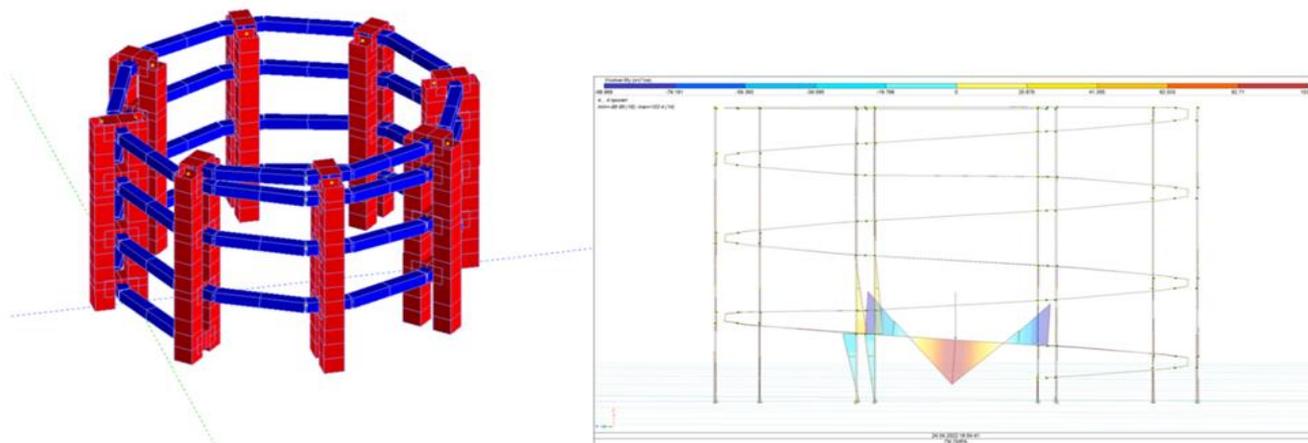


Рис. 7. Расчетная пространственная модель и результаты расчета в ПК LIRA 10.8

## СХЕМА АРКТИЧЕСКОЙ СКОРОСТНОЙ МАГИСТРАЛИ

На этой основе, представленной в предыдущем разделе, разработаны решения по высокоскоростной Арктической транспортно-энергетической магистрали (АТЭМ). Магистраль берет свое начало в Северо-Западном регионе России (морской порт Усть-Луга), проходит по Ленинградской, Вологодской, Архангельской областям, Заполярному региону Европейской части, Сибири и Дальнего Востока, через Берингов пролив и заканчивается на Аляске, соединяя собой два континента.

Еще в советское время руководство страны понимало какой прорыв в экономике отдаленных районов страны может дать использование Северного морского пути (СМП), а в настоящее время освоение СМП продолжается наиболее интенсивно. Так «Газпром», «ЛУКОЙЛ», «Роснефть», «Росшельф», Красноярский край, Якутия, Чукотка являются его основными пользователями. Эксплуатация СМП приведет к снижению стоимости добываемой и производимой в Арктической зоне продукции и, как следствие, повысит ее конкурентоспособность на внутреннем и мировом рынках.

В августе 2022 года правительство утвердило план развития Северного морского пути до 2035 года (распоряжение от 01.08.2022

№ 2115-р). Всего план включает в себя 150 мероприятий, которые входят в пять ключевых разделов, одним из которых является транспортное и энергетическое обеспечение. При этом создание АТЭМ несомненно представляется весьма эффективным решением в рамках развития береговой транспортной, электроэнергетической и аварийно-спасательной инфраструктуры, связывающей морские порты СМП на побережье Белого моря и Северного ледовитого океана (Архангельск, Тикси, Диксон, Певек и т. п.).

На Рис. 8 представлены предложения по устройству двух Арктических скоростных магистралей:

- надземная АТЭМ (протяженность 9683 км) с отечественным и зарубежным участками «Усть-Луга - о. Ротманова» (8422 км), «о. Ротманова – Fairbanks» (1261 км);
- надводная магистраль «Мурманск – Шпицберген» (1350 км), которая будет рассмотрена в следующих публикациях.

Предлагаемая Арктическая транспортно-энергетическая магистраль позволит соединить ключевые транспортно-логистические морские центры и в кратчайшие сроки доставлять к ним персонал, грузы, оборудование, обеспечивать электроэнергией и выполнять аварийно-спасательные функции, например при помощи аварийно-восстановительных поездов и специальной техники для спасения на суше и на море. Представленный вариант прокладки маршрута АТЭМ основан на нескольких важных фундаментальных принципах:

- магистраль АТЭМ проходит через важные логистические центры и города на морском побережье Северного ледовитого океана, на которых устроены пристани для ледокольного флота или развита добыча природных ископаемых;
- устраиваются протяженные прямолинейные участки для сокращения количества ТПУ, ездой с максимальной скоростью и обеспечением минимизации продолжительности поездки;
- минимальные перепады высот рельефа и уход от природных препятствий (гор, водоемов) для минимизации времени поездки.

Станции с остановками или ТПУ, расстояние между ними и продолжительность поездки представлены в Табл. 1.



Рис. 8. Схемы трех магистралей:

- надземная высокоскоростная Арктическая транспортно-энергетическая магистраль «Усть-Луга – Fairbanks» (красный цвет);
- надводная скоростная магистраль «Мурманск-Шпицберген» (фиолетовый цвет);
- Северный морской путь из Архангельска (зеленый цвет)

Таблица. АТЭМ, протяженность и продолжительность проезда

№	Участок	Длина (км)	Время проезда (мин) при максимальной скорости (км/ч)		
			160	500	1000
1	Усть-Луга – Гатчина	110	43,62	15,65	9,08
2	Гатчина – Тихвин	188	72,87	25,01	13,76
3	Тихвин – Череповец	239	92,00	31,13	16,82
4	Череповец – Архангельск	591	224,01	73,38	37,94
5	Архангельск – Нарьян-Мар	677	256,26	83,70	43,10
6	Нарьян-Мар – МореЮ	296	113,37	37,98	20,24
7	МореЮ – Байдарацкая Губа	316	120,87	40,38	21,44
8	Байдарацкая Губа – Полярный Урал	83	33,49	12,41	7,46
9	Полярный Урал – Салехард	167	64,99	22,49	12,50
10	Салехард – Надым	280	107,37	36,05	19,28
11	Надым – Новый Уренгой	202	78,12	26,69	14,60
12	Новый Уренгой – Дудинка	560	212,38	69,66	36,08
13	Дудинка – Новая Река	609	230,76	75,54	39,02
14	Новая Река – Хатанга	98	39,12	14,21	8,36
15	Хатанга – Юрюнг-Хая	368	140,38	46,62	24,56
16	Юрюнг-Хая – Анабарский Залив	128	50,37	17,81	10,16
17	Анабарский Залив – Оленек	98	39,12	14,21	8,36
18	Оленек – Дельта Лены	353	134,75	44,82	23,66
19	Дельта Лены – Порт Тикси	80	32,37	12,05	7,28
20	Порт Тикси – Горный Хребет	57	23,74	9,29	5,90
21	Горный Хребет – Найба	90	36,12	13,25	7,88
22	Найба – Янский Залив	115	45,49	16,25	9,38
23	Янский Залив – Тумат	195	75,49	25,85	14,18
24	Тумат - Хромская Губа	284	108,87	36,53	19,52
25	Хромская Губа - Черский	650	246,14	80,46	41,48
26	Черский - Колымский Залив	114	45,12	16,13	9,32
27	Колымский Залив – Чаунская Губа	280	107,37	36,05	19,28
28	Чаунская Губа – Быстрый	137	53,74	18,89	10,70
29	Быстрый – Пролив Лонга	174	67,62	23,33	12,92
30	Пролив Лонга – Лагуна Тыркунгин	189	73,24	25,13	13,82
31	Лагуна Тыркунгин – Колючинская Губа	355	135,50	45,06	23,78
32	Колючинская Губа – Чукотское Море	89	35,74	13,13	7,82
33	Чукотское Море – Мыс Икигур	94	37,62	13,73	8,12
34	Мыс Икигур – Берингов Пролив	115	45,49	16,25	9,38
35	Берингов Пролив – Остров Ратманова	41	17,74	7,37	4,94
36	Остров Ратманова – Alaska	53	22,24	8,81	5,66
37	Alaska – Shishmarev	118	46,62	16,61	9,56

№	Участок	Длина (км)	Время проезда (мин) при максимальной скорости (км/ч)		
			160	500	1000
38	Shishmarev – Kotzebue Sound	111	43,99	15,77	9,14
39	Kotzebue Sound – Imruk	116	45,87	16,37	9,44
40	Imruk – Golovin	110	43,62	15,65	9,08
41	Golovin – Koyukuk	332	126,87	42,30	22,40
42	Koyukuk – Yukon	256	98,37	33,17	17,84
43	Yukon – Fairbanks	165	64,24	22,25	12,38
	<b>ИТОГО:</b>	9683	3733,07	1267,50	687,54
	<b>ИТОГО (в часах):</b>		62,2 ч	21,1 ч	11,5 ч

Даже с учетом требований по прокладке магистрали, приведенных выше, рельеф остается довольно сложным, что вызывает дополнительные трудности и финансовые затраты, а главное – увеличивает количество ТПУ и продолжительность поездки. Кроме того, скоростное преодоление высоких горных склонов приводит к дополнительным конструктивным усложнениям конструкций и фундаментов магистрали (Рис. 9), повышая материалоемкость, и ухудшает качество поездки в связи с восхождением и понижением положения поезда.

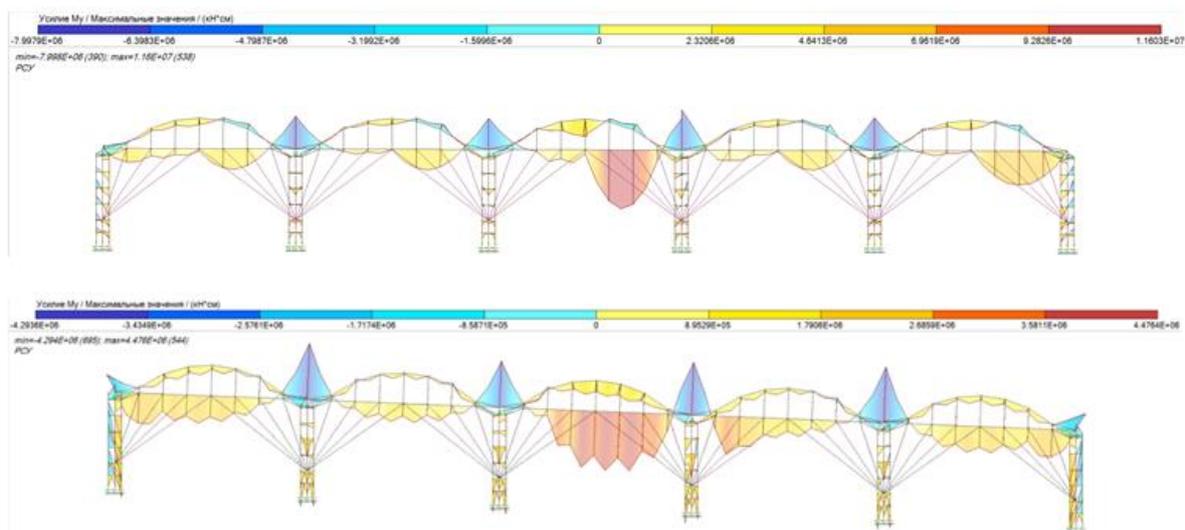


Рис. 9. Сравнительные расчеты арочно-вантовых конструкций АТЭМ на ПК LIRA10.8 с малым уклоном  $i=0,003$  (верхний рисунок) и максимально допустимым уклоном  $i=0,040$  путепровода (нижний рисунок); представлены эпюры моментов в пятипролетной раме из арок пролетом 180 м, загруженной в середине

На основании сравнительных расчетов следует вывод, что с повышением уклона возрастают продольные усилия на 8–18 %, поперечные силы понижаются на 14–29 %, а изгибающие моменты в балке

путепровода снижаются существенно на 36–61 %, что подтверждает необходимость индивидуального проектирования каждого участка Арктической магистрали.

Таким образом магистраль на большом участке от Усть-Луги до пос. Черский на Колыме в Якутии можно провести с небольшим уклоном  $i \leq 0,003 \dots 0,004$ , который будет обеспечивать как дренирование внутреннего пространства труб, так и в прохождении относительно невысоких перепадов с отметкой до 250 м по Балтийской системе высот. Но после пос. Черский (ТПУ «Черский Залив») вертикальные отметки путепровода АТЭМ уже достигнут почти 700 м (Рис. 10). Для решения этой проблемы предлагается альтернативный вариант с морским участком - минимальным количеством ТПУ и сокращением продолжительности проезда до конечного пункта – города Fairbanks на Аляске за 8–9 часов при скорости 1000 км/ч. На этом участке АТЭМ проходит в подводном пространстве между нижней поверхностью арктических льдов и дном Восточно-Сибирского моря (

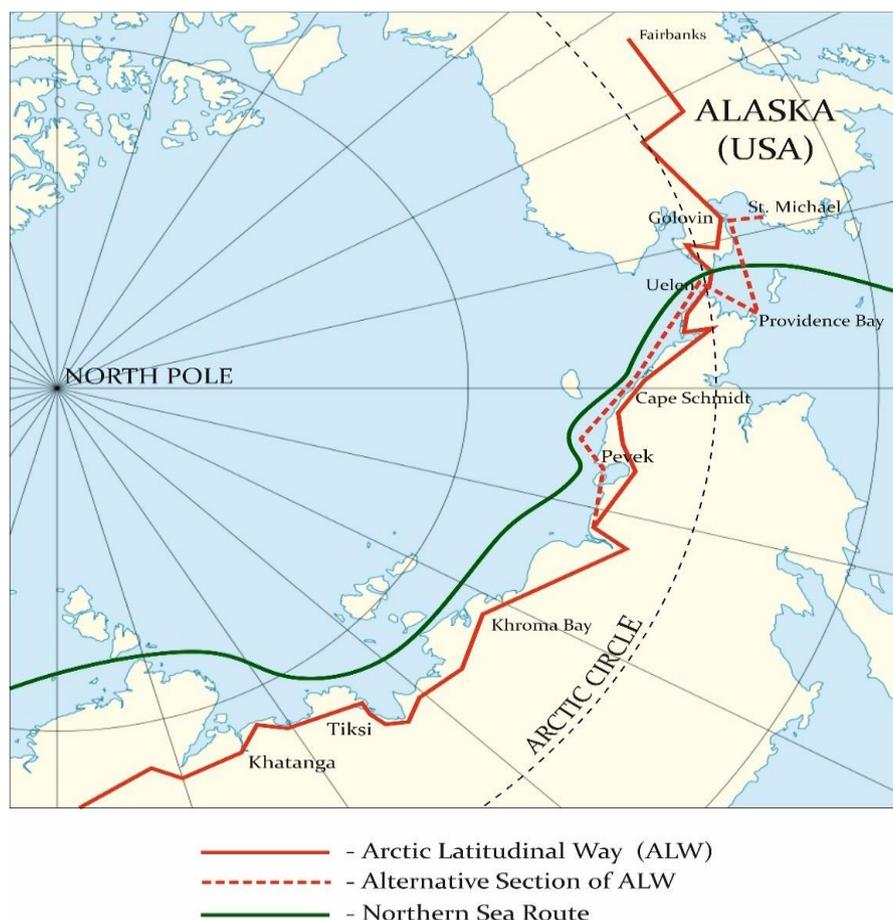


Рис. 11).

Рис. 11. Альтернативный вариант с морским подводным участком (красная пунктирная линия)

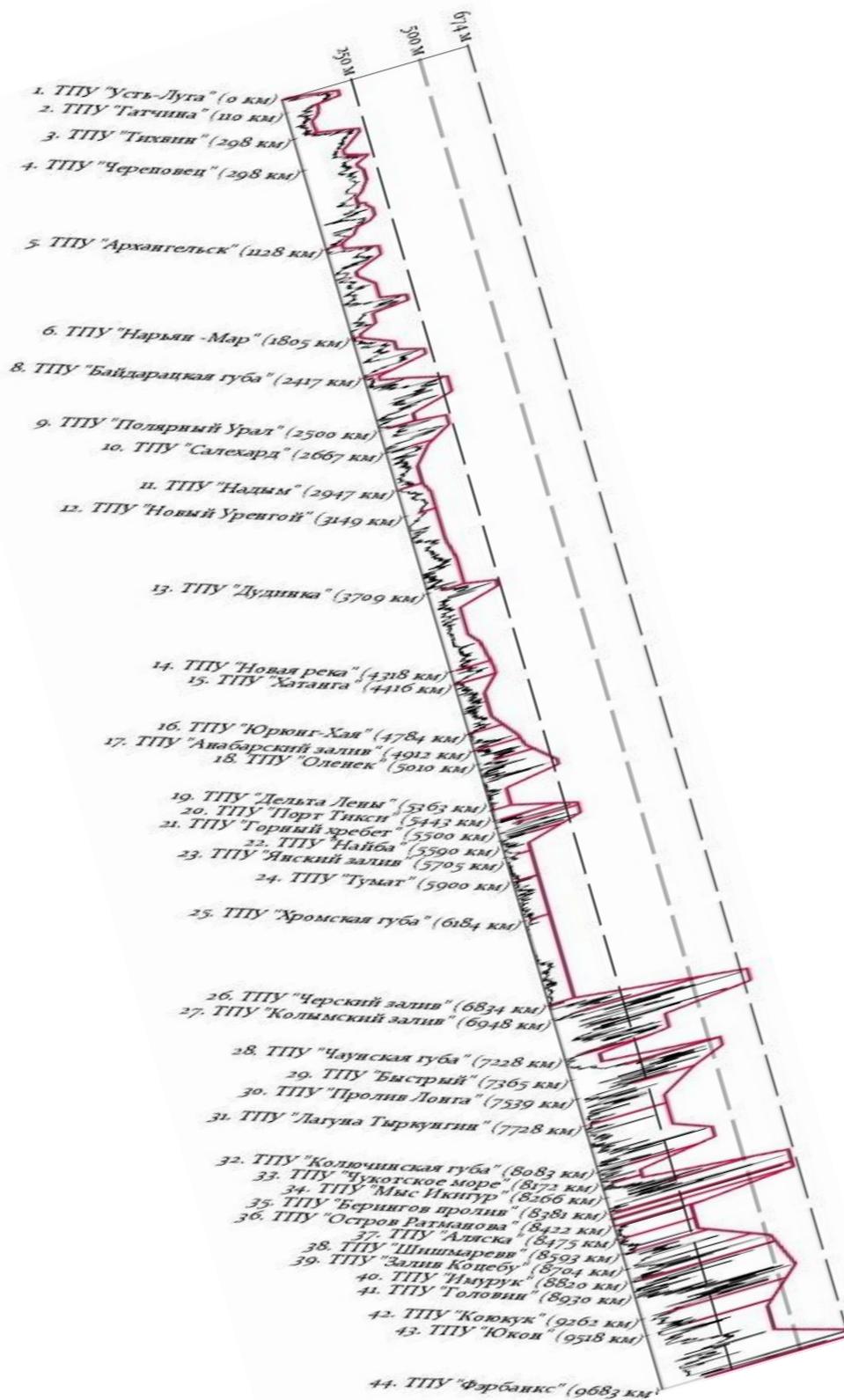


Рис. 10. Профиль Арктической ТЭМ и возможный надземный вариант ее прокладки (красная огибающая линия – ось балки путепровода)

Подводное прохождение Арктической транспортной магистрали в водах Северного ледовитого океана потребует глубокого исследования данного вопроса в настоящей перспективе, так как представляется весьма сложной технической задачей [20].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При проектировании глобальной сухопутной транспортной сети данные исследования подтверждают возможность использования технологии ЕТТ (Evacuated Tube Transportation), а также магнитной левитации (технология Маглев), для высокоскоростной Арктической транспортно-энергетической магистрали.

2. По предварительным технико-экономическим показателям продолжительность доставки грузов по Арктической скоростной магистрали до Берингова пролива по сравнению с Северным морским путем (СМП) сокращается в 5,5 раза, а пассажиров – почти в 30 раз, но при этом протяженность проектируемой скоростной магистрали почти в 1,6 раза выше в связи с необходимостью обхода высоких прибрежных горных массивов, особенно в шельфе Восточно-Сибирского моря.

3. Предложен вариант Арктической транспортно-энергетической магистрали, позволяющий в перспективе соединить ключевые транспортно-логистические морские центры Северного ледовитого океана и в кратчайшие сроки доставлять к ним персонал, грузы, оборудование, обеспечивать электроэнергией и выполнять аварийно-спасательные функции, а также обеспечить проезд пассажира от Санкт-Петербурга до города Fairbanks на Аляске почти за 11 часов.

4. В дальнейших исследованиях следует рассмотреть подводные трубные магистрали, которые будут иметь протяженные прямолинейные участки длиной более 500-1000 км с минимизацией количества транспортно-пересадочных узлов.

5. Трансконтинентальная магистраль через Берингов пролив в целях обеспечения связи транспортных и энергетических систем Евразии и Америки представляется как самый грандиозный проект за всю историю человечества, сопоставимый с освоением космоса!

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках конкурса грантов, утвержденного решением Ученого совета Санкт-Петербургского архитектурно-строительного университета Минобрнауки России от 23.12.2021 №03, в составе НИР «Экспериментально-теоретические исследования эстакадных конструкций и транспортно-пересадочных узлов высокоскоростной магистрали» (шифр № 2С22).

**Авторы заявляют, что:**

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References**

1. Международная конференция «Трансконтинентальная магистраль Евразия-Америка через Берингов пролив» // Forum International. – 2007. – № 7. – 80 с. [International Conference “Intercontinental Eurasia-America Transport Link via Bering Strait”. *Forum International*. 2007;(7):1-80. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 30.10.2022. Доступно по: [https://larouchepub.com/eiw/public/2007/2007\\_20-29/2007-24/pdf/forum\\_7.pdf](https://larouchepub.com/eiw/public/2007/2007_20-29/2007-24/pdf/forum_7.pdf)
2. РАН предложила Путину проект железной дороги через Сибирь // Газета «Взгляд». 23.03.2015. Ссылка активна на: 30.10.2022. Доступно по: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=137215>
3. Сенькин Н.А., Филимонов А.С., Харитонов К.Е. и др. К вопросу о создании высокоскоростной транспортной магистрали в Санкт-Петербурге // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 25–47. [Senkin NA, Filimonov AS, Kharitonov KE, et al. On the Creation of a High-Speed Transport Highway in St. Petersburg. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(4):73-95. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20195425-47
4. Сенькин Н.А., Филимонов А.С., Халимбеков И.М. и др. Предложения по строительству эстакадных конструкций и транспортно-пересадочных узлов высокоскоростной магистрали в Санкт-Петербурге // Транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – № 1. – С. 99–123. [Senkin NA, Filimonov AS, Khalimbekov IM, et al. Proposals for the construction of overpass structures and transport hubs for the high-speed highway in Saint Petersburg. *Transportation Systems and Technology*. 2021;7(1):99-123. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20217199-123
5. Зайцев А.А. Инновации как способ решения глобальных задач // РЖД-Партнер. – 2018. – № 13–14. – С. 35. [Zaitsev AA. *Innovatsii kak sposob reshenia globalnykh zadach* // RZD-PARTNER. 2018;13-14:35. (In Russ.)].
6. Антонов Ю.Ф., Зайцев А.А. Магнитолевитационная транспортная технология / под ред. В.А. Гапановича. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 476 с. [Antonov YuF, Zaitsev AA. *Magnitolevitatsionnaya transportnaya tekhnologiya*. Gapanovich VA, editor. Moscow: FIZMATLIT; 2014. 476 p. ISBN 978-5-9221-1540-7 (In Russ.)].
7. Лаппо Г.М. Города России. Взгляд географа. – М.: Новый хронограф, 2012. – 504 с. [Lappo GM. *Goroda Rossii. Vzglyad geografa*. Moscow: Novyj khronograf, 2012. 504 p. (In Russ.)].
8. Меркулова М.В. Многофункциональный транспортно-пересадочный узел, включающий высоко- и сверхскоростные магистрали / Актуальные проблемы строительства. Материалы 70-й Всероссийской научно-практической конф. студентов, аспирантов и молодых ученых Санкт-Петербургского госуд. архитектурно-строительного ун-та. Ч.1. СПбГАСУ. – СПб, 2017. – С. 244–248. [Merkulova MV. *Mnogofunktsional'nyj transportno-peresadochnyj uzel, vkluchayushchij vysoko- i sverhskorostnye magistrali*. In “Aktual'nye problemy stroitel'stva” Materialy 70-j Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh St-Petersburg: GASU; 2017. pp. 244-248 (In Russ.)].
9. Медведев Н.Е. Варианты конструктивных решений надземных сооружений высоко- и сверхскоростной транспортной систем / Актуальные проблемы строительства. Материалы 70-й Всероссийской научно-практической конф. студентов, аспирантов

- и молодых ученых Санкт-Петербургского госуд. архитектурно-строительного ун-та. Ч.1. СПбГАСУ. – СПб, 2017. – С. 240–244. [Medvedev NE. Varianty konstruktivnyh reshenij nadzemnyh sooruzhenij vysokoi sverhskorostnoj transportnoj system. In “Aktual'nye problemy stroitel'stva” Materialy 70-j Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh St-Petersburg: GASU; 2017. pp. 240-244 (In Russ.)].
10. Якуненкова М.С. Транспортный хаб как тип общественного комплекса. Функциональные элементы транспортного хаба / Архитектура – строительство – транспорт: материалы 72-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета. Ч.1. СПбГАСУ. – СПб, 2019. – С. 185–189. [Yakunenkova MS. Transportnyj hab kak tip obshchestvennogo kompleksa. Funkcional'nye elementy transportnogo haba. In Aktual'nye problemy stroitel'stva. Materialy 72-j Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh St-Petersburg: GASU; 2019. pp. 185-189 (In Russ.)].
  11. Бондарева Е.О. Городской многофункциональный транспортно-пересадочный узел, включающий высокоскоростную магистраль / Актуальные проблемы строительства. Материалы 70-й Всероссийской научно-практической конф. студентов, аспирантов и молодых ученых Санкт-Петербургского госуд. архитектурно-строительного ун-та. Ч.1. СПбГАСУ. – СПб, 2017. – С. 207–211. [Bondareva EO. Gorodskoj mnogofunkcional'nyj transportno-peresadochnyj uzel, vklyuchayushchij vysokoskorostnuyu magistral'. In “Aktual'nye problemy stroitel'stva” Materialy 70-j Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh St-Petersburg: GASU; 2017. pp. 207-211 (In Russ.)].
  12. Андреев Д.М., Большихшапок И.С. Предложения по строительству эстакадных конструкций и транспортно-пересадочных узлов высокоскоростной магистрали от Гатчины до Санкт-Петербурга / Магистратура – транспортной отрасли. Материалы VI Всероссийской межвузовской конференции «Магистерские слушания». 21–22 октября 2021 г. СПбГАСУ. – СПб, 2022. – С. 9–22. [Andreev DM, Bolshikhshapok IS. Proposal for the construction of overpass and transportation hubs of the high-speed railway from Gatchina to Saint Petersburg. In Magistratura – transportnoy otrasly. Materialy VI-j Vserossijskoj mezhvuz. konf. Magistr. Slushania. St. Petersburg: GASU; 2022. pp. 9-22 (In Russ.)].
  13. Вакуленко С.П., Евренова Н.Ю. Техническое оснащение и технология работы транспортно-пересадочных узлов, формируемых с участием железнодорожного транспорта: Учебное пособие. – М.: МИИТ, 2015. – 195 с. [Vakulenko SP, Evreenova NYu. Tekhnicheskoe osnashchenie i tekhnologiya raboty transportno-peresadochnyh uzlov, formiruemyh s uchastiem zheleznodorozhnogo transporta: Uchebnoe posobie. Moscow: MIIT; 2015. 195 p. (In Russ.)].
  14. Terentyev YuA, Filimonov VV, Malinetskiy GG, et al. Russia Integrated Transit Transport System (ITTS) Basid on Vacuum Magnetic Levitation Transport (VMLT). *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(3):57-84. doi: 10.17816/transsyst201843s157-84
  15. Kim KK. The Russian Version of the Transport System “Hyperloop”. *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(2):73-91. doi: 10.17816/transsyst20184273-91
  16. Musk E. Huperloop Alpha. Texas: SpaceX [cited 2019 July 28]. Available at: [https://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop\\_alpha-20130812.pdf](https://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha-20130812.pdf)
  17. Федорова М.В. Скоростной городской транспорт для современной агломерации // Транспортные системы и технологии. – 2015. – Т. 1. – № 1. – С. 26–36. [Fedorova MV. Speed urban transport for modern agglomeration. *Transportation Systems and Technology*. 2015;1(1):26-36 (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20151126-36

18. Галашкин Г.Н. Особенности проектирования и строительства Маглев-дорог для грузовых перевозок // Транспортные системы и технологии. – 2016. – Т. 2. – № 2. – С. 53–56. [Talashkin GN. Features of design and construction Maglev-road to freight. *Transportation systems and technology*. 2016;2(2):53-56 (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20162253-56
19. Oster Daryl, inventor. Evacuated tube transport. United States patent US5950543 (A). 1999 Sept. 14. Available from: <https://patents.google.com/patent/US5950543A/en>
20. Сенькин Н.А., Филимонов А.С., Халимбеков И.М. О живучести строительных конструкций морского участка высокоскоростной транспортной магистрали от навала судна // *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal)* – 2020. – № 11. – С. 40–46. [Sen'kin NA, Filimonov AS, Halimbekov IM. O zhivuchesti stroitel'nyh konstrukcij morskogo uchastka vysokoskorostnoj transportnoj magistrali ot navala sudna. *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal)*. 2020;(11):40-46 (In Russ.)].

#### Сведения об авторах:

**Сенькин Николай Александрович**, кандидат технических наук, доцент;

eLibrary SPIN: 1344-9412; ORCID: 0000-0002-7086-1960

E-mail: senkin1952@yandex.ru

**Андреев Дмитрий Максимович**, бакалавр;

eLibrary SPIN: 2740-6795; ORCID: 0000-0003-2242-5731

E-mail: andreevd\_m@mail.ru

**Васильев Валерий Сергеевич**, бакалавр;

eLibrary SPIN: -; ORCID: 0000-0002-9247-9818

E-mail: valera-vasilev-99@mail.ru

#### Information about authors:

**Nikolai A. Senkin**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.

eLibrary SPIN: 1344-9412; ORCID: 0000-0002-7086-1960

E-mail: senkin1952@yandex.ru

**Dmitry M. Andreev**, Bachelor of Science.

eLibrary SPIN: 2740-6795; ORCID: 0000-0003-2242-5731

E-mail: andreevd\_m@mail.ru

**Valery S. Vasilev**, Bachelor of Science.

eLibrary SPIN: - ORCID: 0000-0002-9247-9818

E-mail: valera-vasilev-99@mail.ru

#### Цитировать:

##### To cite this article:

Сенькин Н.А., Андреев Д.М., Васильев В.С. Предложения по созданию высокоскоростных транспортных магистралей в Арктической зоне: конструкции и технологии // *Инновационные транспортные системы и технологии*. – 2023. – Т. 9. – № 1. – С. 44–63. doi: 10.17816/transsyst20239144-63

##### To cite this article:

Senkin NA, Andreev DM, Vasilev VS. Proposals for the creations of high-speed transport Highways in The Arctic zone: Constructions and Technologies. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(1):44-63. doi: 10.178/transsyst20239144-63