

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Строительные конструкции и транспортные системы

<https://doi.org/10.17816/transsyst626502>© Н.А. Сенькин, В.М. Закарлюкина, Э.В. Давидюк, П.А. Ли,
И.С. БольшихшапокСанкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный
университет (Санкт-Петербург, Россия)**КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ
ПО СОЗДАНИЮ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ТРАНСПОРТНО-
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ МАГИСТРАЛИ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ**

Обоснование. Развитие Северного Морского Пути (СМП) представляет особый интерес для транзита грузов и судов, а также для интенсификации добычи полезных ископаемых на шельфе и прибрежных территориях страны. 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 предлагается создать дополнительную высокоскоростную грузопассажирскую систему, характеризующуюся движением грузовых модулей со скоростью до 200 км/ч и пассажирских модулей – до 500–1000 км/ч. Предполагается, что проектируемая магистраль позволит соединить ключевые транспортно-логистические морские порты для ледокольного флота и в кратчайшие сроки обеспечить экстренную доставку пассажиров, оборудования и грузов при возникновении чрезвычайных ситуаций.

Цель. Разработка высокоскоростной транспортно-энергетической 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 SAP2000, «SCAD Office» и «Lira».

Результаты. По предварительным технико-экономическим расчетам предполагается, что продолжительность доставки грузов по Арктической сверхскоростной магистрали до Берингова пролива по сравнению с СМП сократится 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.

Закключение. При проектировании глобальной сухопутной высокоскоростной транспортной сети данные исследования подтверждают возможность использования технологий Evacuated Tube Transportation и Маглев для Арктической сверхскоростной транспортной магистрали. В дальнейших исследованиях будут рассмотрены туннельные горные проходки и подводные трубные магистрали, которые приведут к протяженным прямолинейным участкам длиной более 1000 км, обеспечивающим сокращение общей протяженности АТЭМ, продолжительности транспортировки пассажиров и грузов и минимизацию количества транспортно-пересадочных узлов (ТПУ).

Ключевые слова: арктические условия эксплуатации; высокоскоростная транспортно-энергетическая магистраль; арочная эстакада из труб большого диаметра; магнитно-левитационная подушка; пониженное давление в трубах; опоры линии электропередачи.

Как цитировать:

Сенькин Н.А., Закарлюкина В.М., Давидюк Э.В., Ли П.А., Большихшапок И.С. Конструктивно-технологические предложения по созданию высокоскоростной транспортно-энергетической магистрали в Арктике // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 2. С. 247–273. doi: 10.17816/transsyst626502

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS

Subject – Construction structures and transportation system

© N.A. Senkin, V.M. Zakarlyukina, E.V. Davidyuk, P.A. Lee,
I.S. BolshikhshapokSt. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering
(St. Petersburg, Russia)**CONSTRUCTIVE AND TECHNOLOGICAL PROPOSALS
FOR THE CREATION OF A HIGH-SPEED TRANSPORT
AND ENERGY HIGHWAY IN THE ARCTIC ZONE**

Background. St. Petersburg University of Architecture and Civil Engineering is developing alternative proposals creating a high-speed highway in the Arctic zone along the Northern Sea Route. This project includes stops at major transport and logistics centers along the country's coast as part of research by future master builders. The Arctic Transport and Energy Highway originates in the Northwestern region of Russia, starting from the seaport of Ust-Luga. The route passes through the Leningrad and Arkhangelsk regions, the Polar regions of European Russia, Siberia, Chukotka, and ends in Alaska via the Bering Strait, thereby connecting two continents. The structure of this highway includes an overhead power line with a voltage of 330 kV running along its entire length on common load-bearing structures. This line will connect to the main electric networks of the country, including the floating power plant Akademik Lomonosov in the port of Pevek. South of Gatchina in the Leningrad Region, a large Transport Interchange Hub is proposed, where an urban high-speed transportation highway from St. Petersburg will connect to the highway. The results of scientific research on the layout and architectural design of transportation hubs are presented.

Aim. The aim of this study is the development of a high-speed transport and energy highway in the Arctic zone, based on the widespread use of electric transportation.

Materials and Methods. The highway route was built, and trestle structures were designed to handle combinations of operating loads, forces and influences. These designs account for dynamic aspects and nonlinearity, using software such as SAP2000, SCAD Office, and Lira.

Results. Preliminary technical and economic indicators show that 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, and passenger travel time is reduced by almost 30 times. However, the projected expressway is almost 1.6 times longer owing to the need to bypass high coastal mountain ranges.

Conclusion. These studies confirm the feasibility of using evacuated tube transportation and maglev technologies for the Arctic high-speed transportation highway. Future research will consider tunnel mining and underwater pipelines, which will allow for extended rectilinear sections exceeding 1000 km. This would reduce the total length of the Arctic transportation and energy highway, decrease transportation duration for passengers and cargo, and minimize the number of transportation hubs.

Keywords: Arctic operating conditions, high-speed transport and energy highway, arched overpass of large diameter pipes, magnetic levitation cushion, low pressure in pipes, power transmission line supports.

To cite this article:

Senkin NA, Zakarlyukina VM, Davidyuk EV, Li PA, Bolshikhshapok IS. Constructive and technological proposals for the creation of a high-speed transport and energy highway in the Arctic. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(2):247–273. doi: 10.17816/transsy626502

ВВЕДЕНИЕ

Выдающийся экономист и организатор в области развития транспортных технологий профессор Анатолий Александрович Зайцев (06.02.1940–13.02.2022) однозначно определил будущее за магнито-левитационной транспортной технологией, которая обеспечит создание общенациональной системы сверх- и высокоскоростного наземного пассажирского и грузового транспорта. Такая транспортная система будет иметь неоспоримые преимущества перед другими транспортными технологиями в ускорении перевозок, что приведет к значительному социальному и экономическому эффекту [1].

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

Известны несколько значимых попыток по строительству транспортных магистралей через Берингов пролив от времени Императора Николая Александровича Романова, высочайше одоббившего предложение о строительстве Сибирско-Аляскинской железной дороги от мыса Принца Уэльского на Аляске в Иркутск, до времен современных, когда на Международной конференции в Москве в 2007 году была поддержана идея строительства «Трансконтинентальной Магистрали Евразия – Америка через Берингов пролив» [2] с целью формирования единой глобальной сухопутной транспортной сети со связью транспортных и энергетических систем Евразии и Америки. Кроме того, 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», позволит решить многие проблемы огромного региона Сибири и Дальнего Востока [3].

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 наземной высокоскоростной транспортной магистрали (ВСТМ) [4]. Городские ВСТМ системы «Роса» будут запроектированы на движение высокоскоростных пассажирских электропоездов с максимальной скоростью 500 км/ч с применением технологий Маглев

и ЕТТ (Evacuated Tube Transportation) [4–17]. Так в первой авторской статье под названием «К вопросу создания высокоскоростной транспортной магистрали в Санкт-Петербурге», опубликованной в электронном журнале «Транспортные системы и технологии» в 2019 году, разработана основная концепция ВСТМ «Роса» и представлены результаты научно-исследовательских работ (НИР) за 2017–2019 гг. по вышеуказанной теме (Часть 1). Разработана окружная «кольцевая» и технологическая системы 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.

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

В третьей статье [4] по итогам исследований 2021–2022 годов (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 включительно.

В настоящей статье по результатам НИР 2022–2023 гг. (Часть 4) предлагается дальнейшее развитие транспортной магистрали, основная часть которой прокладывается в Арктической зоне страны. При этом в ее структуре по всей протяженности на общих несущих конструкциях предусматривается прокладка воздушной линии электропередачи напряжением 330 кВ (ВЛ 330 кВ) с подключением к основным электрическим сетям на севере страны, включая плавучую электростанцию «Академик Ломоносов» в порту Певек. Кроме того, южнее г. Гатчина

(Ленинградская обл.) предлагается построить большой ТПУ с депо, где к АТЭМ предполагается подвести городскую ВСТМ из Санкт-Петербурга.

НОВАЯ СХЕМА АРКТИЧЕСКОЙ ТРАНСПОРТНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ МАГИСТРАЛИ

Развитие арктических регионов нашей страны является одним из наиболее перспективных путей развития экономики России, в связи с большими запасами природных ископаемых и высокими туристическими перспективами. Данная гипотеза подтверждается планом развития Северного морского пути (СМП), принятым в 2022 году [18, 19]. СМП на сегодняшний день является практически единственным доступом к ресурсам Арктического шельфа и побережья. Его развитие приведет к увеличению рабочих мест и численности населения Крайнего Севера, развитию международных связей, морского транспорта и показателей экономического роста.

Инновационная сверхскоростная АТЭМ, изображенная на Рис. 1, представляет собой уникальное техническое решение, приводящее к синергетическому единству современной технологии и «ранимой» природы Крайнего Севера, что обеспечит его устойчивое развитие, повышение жизненного уровня местного населения и высокие инвестиции в развитие арктических регионов.

Основная идея Арктической магистрали заключается в том, чтобы создать наиболее короткий и прямой маршрут через Арктику, который позволит обойти длинные и загруженные проливы Северного



Рис. 1. Общий вид АТЭМ с ТПУ «Колымский залив»

Fig. 1. General view of the arctic energy transportation highway (AETH) with the «Kolyma Bay» interchange hub (IH)

Ледовитого Океана, такие как Лонга, Поморский, и сократить расстояние между Европейской и Азиатской частями России и Аляской. Указанное обстоятельство будет способствовать повышению безопасности функционирования ледокольного флота, а также развитию межконтинентальной торговли, улучшению доступности ресурсов и повышению экономического потенциала Арктических регионов.

Арктическая магистраль позволит сократить время и стоимость перевозки грузов между Азией и Европой, открыв новые перспективы для торговли и экономического развития региона. Проект предусматривает строительство новых портов, развитие инфраструктуры и создание специализированных ледоколов, способных обеспечивать безопасную навигацию даже в самых сложных ледовых условиях.

Реализация предложенного проекта позволит решить основную проблему Северного морского пути – обеспечение безопасности населения и персонала ледокольного флота. При надежной круглосуточной и высокоскоростной эксплуатации магистрали закрываются вопросы эвакуации рабочего персонала, экстренной транспортировки ремонтных бригад при чрезвычайных происшествиях на объектах шельфа и побережья Ледовитого океана. Обеспечивается быстрое реагирование на аварии, что приведет к минимизации необратимых последствий и финансовых затрат.

Магистраль планируется начать на базе контейнерного флота в Усть-Луге, а дальше она пройдет по Ленинградской, Вологодской, Архангельской областям, далее через Заполярный регион, Сибирь и Чукотку она должна прийти к Берингову проливу. Авторами настоящего исследования также предложено провести арктическую магистраль далее до Аляски. Реализация предложенного проекта приведет к развитию береговой, электроэнергетической и аварийно-спасательной инфраструктур, за счет обеспечения транспортной доступности отдалённых районов.

В рамках представленного исследования была разработана новая схема АТЭМ. Предложенное ранее решение схемы [4] потребовало доработки в части уточнения расположения транспортно-пересадочных узлов. Предлагаемая схема позволяет сократить время в пути от начала до конца маршрута, а также снизить стоимость реализации проекта.

Горная местность значительно усложнила прокладку АТЭМ, приводя к необходимости более частого расположения пересадочных узлов, например, в районе Северо-Сибирской низменности из-за необходимости огибания хребтов и речных каналов, что невозможно сделать изменением уклона самого путепровода. Диаграмма высот представлена на Рис. 2.

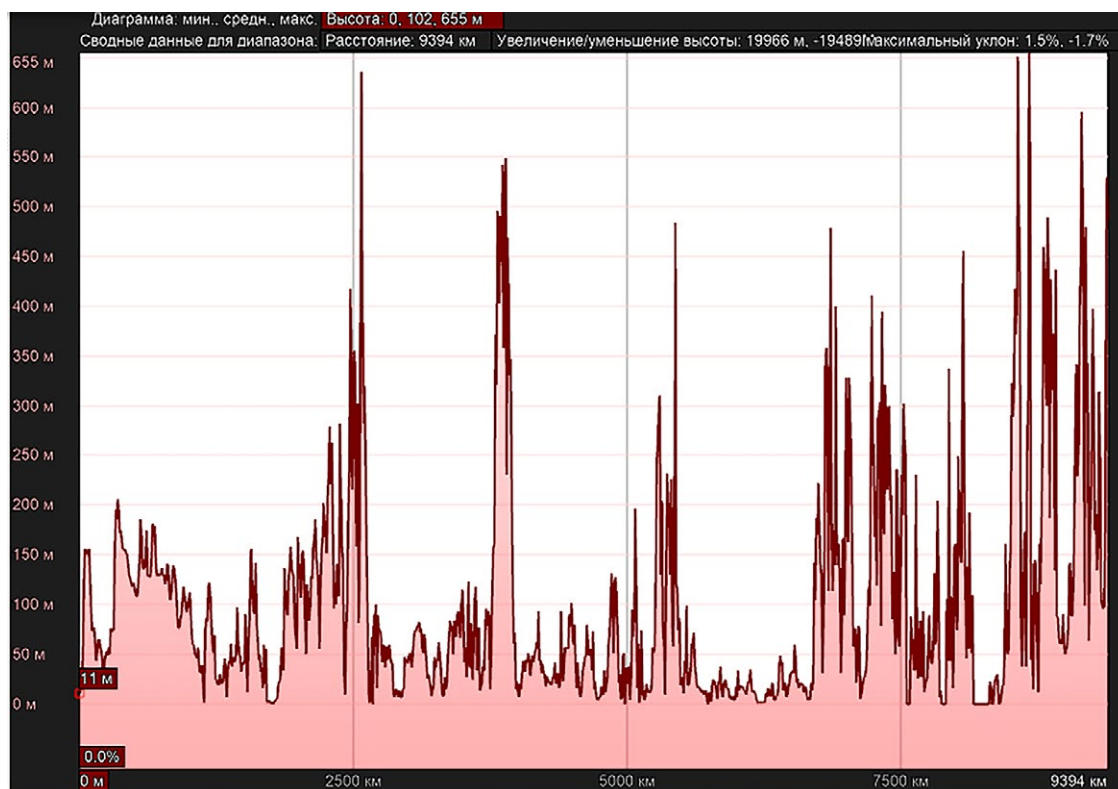


Рис. 2. Диаграмма высот (развертка линии рельефа Усть-Луга – Fairbanks)

Fig. 2. Elevation diagram (Ust-Luga – Fairbanks relief line sweep)

Новое расположение магистрали диктуется не только сложными условиями горного рельефа, но и необходимостью размещения ТПУ вблизи крупных портов и поселений на прибрежных арктических территориях.

В данной статье представлен новый вариант схемы АТЭМ, отличающейся сокращением протяженности пути с 9683 км [4] до 9524 км, что приведет к снижению продолжительности поездки и инвестиционных затрат за счет исключения некоторых транспортно-пересадочных узлов с 43 [4] до 40 единиц. Таким образом, время в пути по новой схеме прокладки при скорости 160 км/ч для грузов составит 61,2 ч, а для пассажиров – 500 км/ч – 20,5 ч, 1000 км/ч – 10,83 ч. На Рис. 3 представлена линия АТЭМ с расположением ТПУ от Усть-Луги до Аляски.

На данном этапе удалось решить проблему сложного рельефа за счет обхода высоких гор. В перспективе развития транспортного и горного строительства возможен вариант преодоления гор напрямую [20–23], например, прокладкой туннелей, и, как следствие, сокращение протяженности пути за счет спрямления и исключения из состава магистрали некоторых ТПУ.

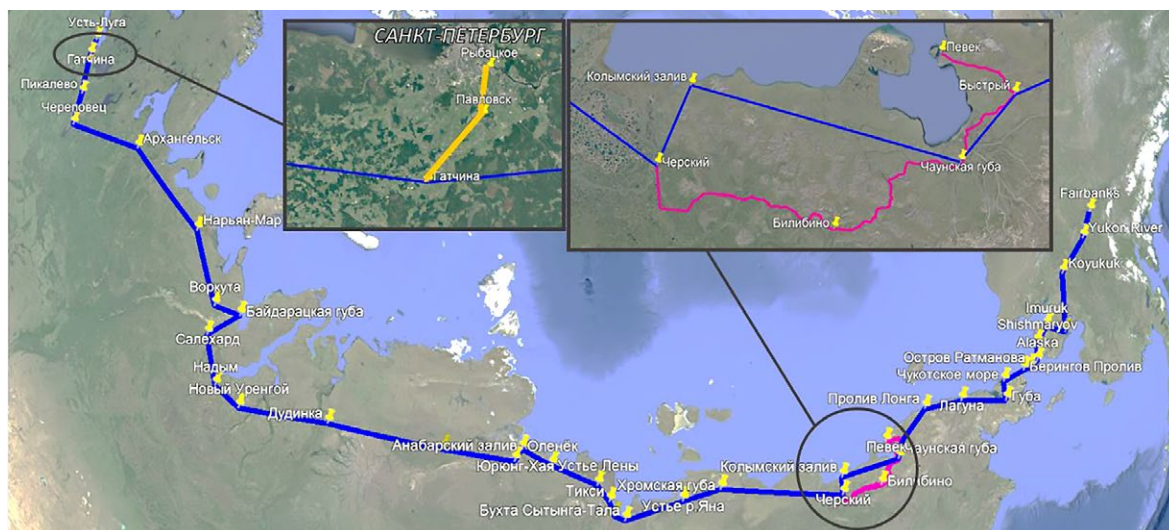


Рис. 3. Общий вид АТЭМ (АТЭМ – синяя линия, трасса ВЛ 330 кВ от Певека – красная, ВСТМ Санкт-Петербурга: ТПУ «Рыбацкое» – ТПУ «Гатчина» – желтая линия)

Fig. 3. General view of the AETH (AETHN – blue line, 330 kV overhead line route from Pevek – red line, St. Petersburg VSTM: IN Rybatskoye – IN Gatchina – yellow line)

На Рис. 4 представлена основная технологическая структура транспортно-энергетической магистрали [4].

Согласно ранее предложенным конструктивным решениям [4], пролетные строения путепровода поддерживались арочно-вантовыми системами. Указанное решение не приемлемо в условиях Арктики по причине значительных гололедных образований на строительные конструкции, создающих нерасчетные нагрузки на вантовые элементы, поэтому потребовалась разработка принципиально новых решений, отличных от вантовых.

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ АТЭМ

Разработка конструктивно-технологических решений, обеспечивающих функционирование, требуемую надежность, безопасность, а также снабжение электроэнергией арктических регионов и транспортного оборудования является основным направлением при конструировании несущих конструкций АТЭМ. Для приближенного учета особых полярных условий при проектировании сооружений АТЭМ расчетный климатический район в выполняемых ниже проектах принят на один выше [24, 25]. Например, для порта Певек назначается расчетный

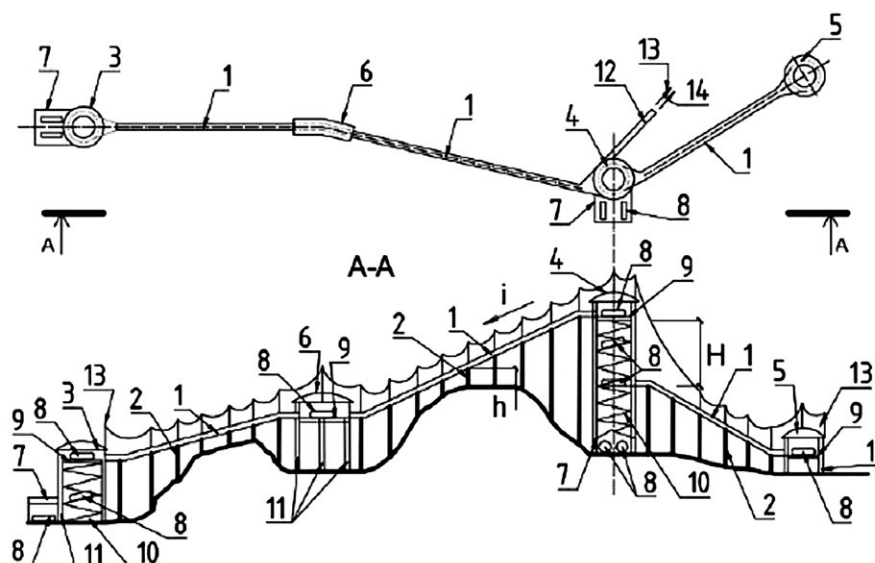


Рис. 4. Основная технологическая структура транспортно-энергетической магистрали (элементы и варианты)

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

Fig. 4. Basic technological structure of the transportation-energy highway (elements and variants)

1 – beam-puteprovod; 2 – multi-span trestle; 3 – IH building with a circular ramp that allows the train to be lifted and lowered vertically when traveling in a spiral (variant 1); 4 – the same, with T-junction (variant 2); 5 – IH building with a circular apron for turning trains (variant 3); 6 – the same, for turning the main line (variant 4); 7 – depot building; 8 – train of transportation modules; 9 – apron for passenger boarding and disembarkation; 10 – spiral ramp; 11 – supporting columns of the IH building with stairs and elevators; 12 – overpass branch; 13 – overhead power transmission line; 14 – cable power line; h – height of the position of the beam-puteprovod relative to the ground surface; H – height difference in height between two positions of the girder-puteprovod of the main line

ветровой район V, на один район выше нормативного IV района по Картам районирования, прилагаемым к СП 20.13330.2016 (с Изм.1–4) «Нагрузки и воздействия». Кроме того, на устраиваемой одноцепной воздушной линии (ВЛ) электропередачи напряжением 330 кВ (ВЛ 330 кВ) в составе АТЭМ устроены четыре фазы (одна резервная) с целью обеспечения высокой надежности электроснабжения транспортного оборудования.

Далее, для выбора оптимального решения конструктивной основы магистрали, а именно высотных и большепролетных несущих конструкций, поддерживающих балку путепровода и опоры ВЛ 330 кВ, выполнены расчеты с подбором сечений четырех вариантов конструкции АТЭМ, исключая вантажные элементы (оттяжки и внешние затяжки). В первом варианте будут применены два компактированных провода в фазе типа АСПк 300/39 с треугольной решеткой связей, соединяющей две арки синусообразного очертания, во втором тот же провод, но с применением решетки из связей с нисходящими раскосами, в третьем варианте – один компактированный провод в фазе типа GZTACSR600 и треугольная решетка, в четвертом – тот же провод, но раскосная решетка с нисходящими раскосами. Характеристики данных проводов приведены в Табл. 1, включая обычный некомпактированный провод марки АС300/39 с повивами из круглых проволок.

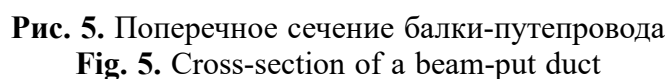
Главная балка путепровода выполнена четырехтрубной с рельсовым основанием в каждой трубе, отведенным под транспортные нужды, возникающие при разгоне, торможении и аварийных ситуациях. Сечение

Таблица 1. Исходные характеристики проводов и грозотросов

Table 1: Initial characteristics of wires and lightning ropes

Наименование и основные характеристики	АСПк 300/39	АС 300/39	GZTACSR 600	Грозотрос ОКГТ-С-24-13,1 мм- 45кА2·с-120 кН
Номинальное сечение, мм ² (алюминий/сталь)	300/39	300/39	615,7/56,29	95,2
Диаметр, мм	21,7	24,0	31,5	13,1
Диаметр стального сердечника, мм	11,5	7,95	9,6	93,6
Масса 1 км провода, кг	1116	1132	2179	640
Модуль деформации, МПа	114000	77000	205900	200000

Из Табл. 1 следует, что современные термостойкие компактированные провода обладают целым рядом достоинств. Например, модуль деформации провода АСПк 300/39 в 1,48 раза выше, чем у обычного



АС 300/39, поэтому стрела провеса также будет меньше в 1,48 раза, несмотря на равное номинальное сечение.

Выполнены расчеты четырех вариантов конструкции с определением нормальных и касательных напряжений в элементах и перемещений узлов с использованием программного комплекса SAP2000 на расчетные сочетания нагрузок и воздействий (воздействия от собственного веса конструкций, снеговых, ветровых, гололедных нагрузок, нагрузок от подвижного состава, включая продольные нагрузки от торможения-разгона составов и нагрузки от ВЛ). Расчет ВЛ, входящих в конструкцию опор путепровода, производился для сочетания следующих условий в соответствии с ПУЭ-7: максимальная температура при отсутствии ветра и гололеда; минимальная температура при тех же условиях; среднегодовая температура при тех же условиях; наличие гололеда при отсутствии ветра; наличие ураганного ветра при отсутствии гололеда; ветер и гололед действуют совместно; аварийные режимы; монтажный режим. В результате вычислены абсолютные значения перемещений и усилий.

Окончательно, на основании результатов расчета (усилия и прогибы) определен оптимальный вариант № 3 при использовании провода GZTASR 600 (отечественное производство) и треугольной решетки расположения связей на синусообразной арке Табл. 2. Данный вариант оказался менее металлоемким, нежели вариант с раскосной решеткой, на 1,74%. Кроме того, вариант при использовании одного провода в фазе показал наименьшие нагрузки, а схемы с данным проводом показали наименьшие перемещения. Расход стали для 1 и 3 вариантов схем составил 37,78 т на пог.м магистрали, для 2 и 4-го вариантов – 38,45 т/м.

Далее, по полученным значениям усилий и прогибов, были подобраны сечения элементов конструкции. В результате в качестве основных несущих элементов были приняты стальные трубы большого диаметра из стали С390. Наприме, главная транспортная балка составлена из четырех труб диаметром 3,85 м с толщиной стенки 25 мм. Колонны рамы выполнены из стальных труб наружным диаметром 2,0 м с толщиной стенки 25 мм. При этом вертикальные и наклонные элементы выполнены трубобетонными. Элементы синусоидальных арок и траверсы запроектированы из труб диаметра 1,50 м с толщиной стенки 40 мм. Связи для 1 и 2 вариантов выполнены из труб сечением 0,78 м с толщиной стенки 20 мм, для связей 3 и 4 вариантов – трубы диаметром 0,86 м. Пилоны запроектированы в виде рамной системы, стойки которой представлены трубобетонными элементами, являющимися продолжением

свайной подземной части конструкции. Сверху на трубобетонные колонны установлены стойки аналогичного сечения для опор линии электропередачи ВЛ 330 кВ (см. Рис. 6). Для сопряжения частей и секций применены болтовые соединения на высокопрочных болтах.

Главным критерием оценки эффективности решения является металлоемкость, которая напрямую влияет на стоимость реализации пролетного строения [24, 25]. Из опыта по возведению Маглев-линий компании Transrapid основная часть затрат уходит на возведение ТПУ и магистралей. Наиболее эффективное конструктивное решение (вариант № 3) было принято в результате выбора конструкций из четырех вариантов.

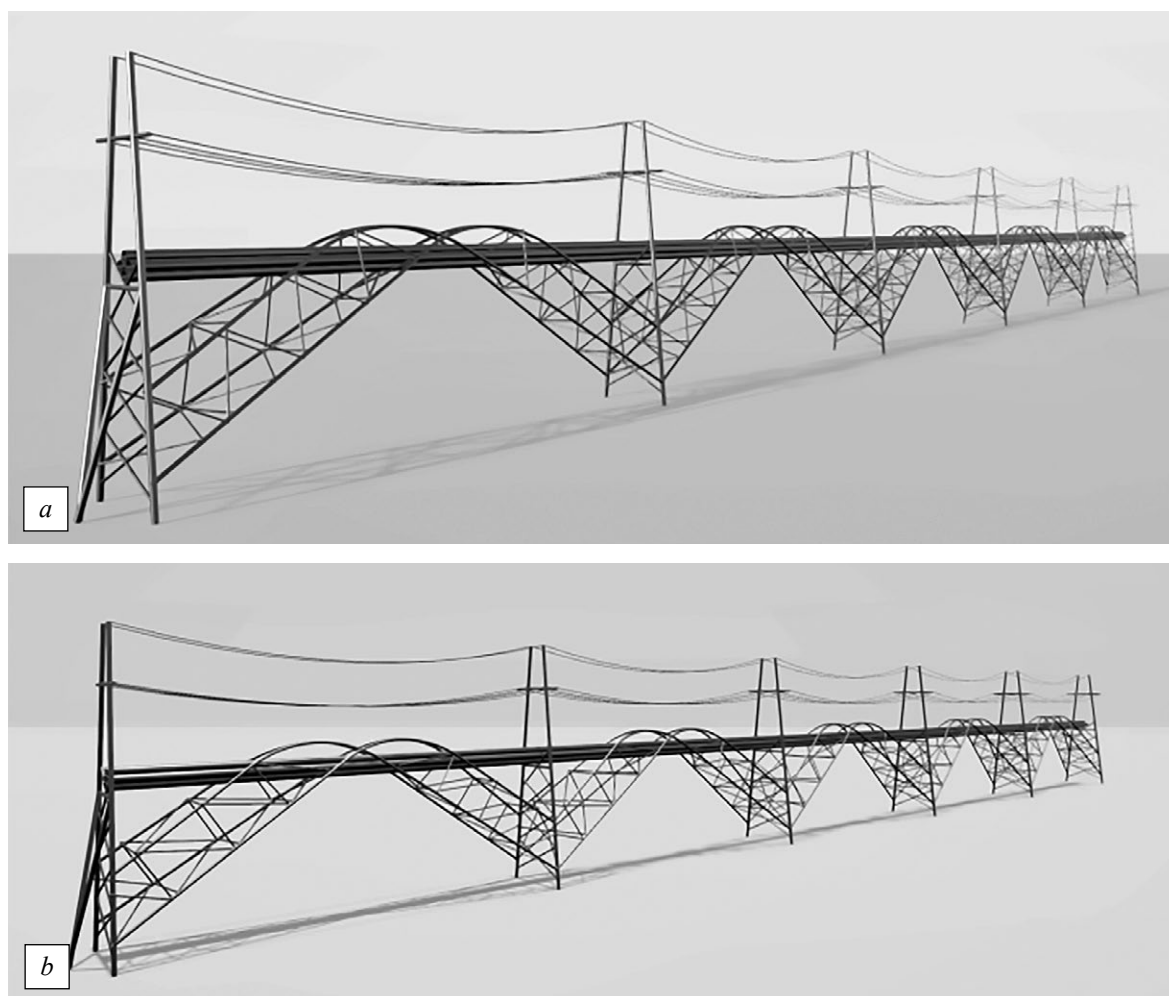


Рис. 6. Конструкции блока хребтовых арок с треугольной решеткой, соединяющей две арки синусообразного очертания (а); то же, с раскосной решеткой (b)

Fig. 6. Ridge arch block constructions with triangular lattice connecting two arches of sinusoidal outline (a); the same, with strut lattice (b)

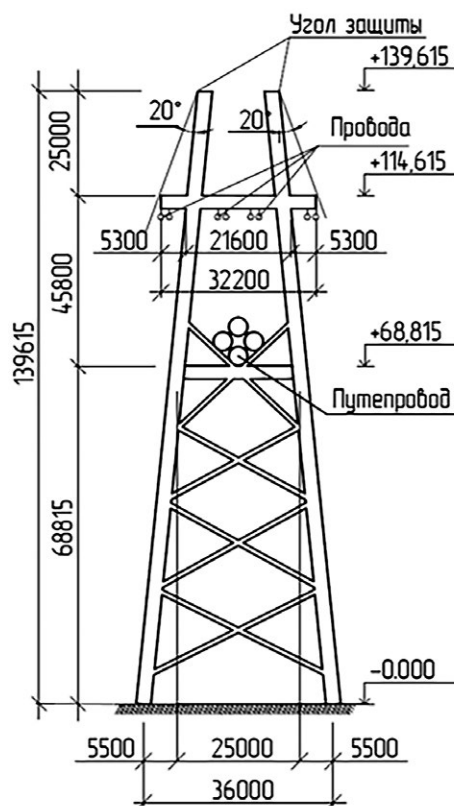


Рис. 7. Поперечный вид рамы-колонны:
два провода в фазе АСПк 300/39 (вариант 1)
Fig. 7. Cross-sectional view of the frame-column:
two wires in phase ASPk 300/39 (variant 1)

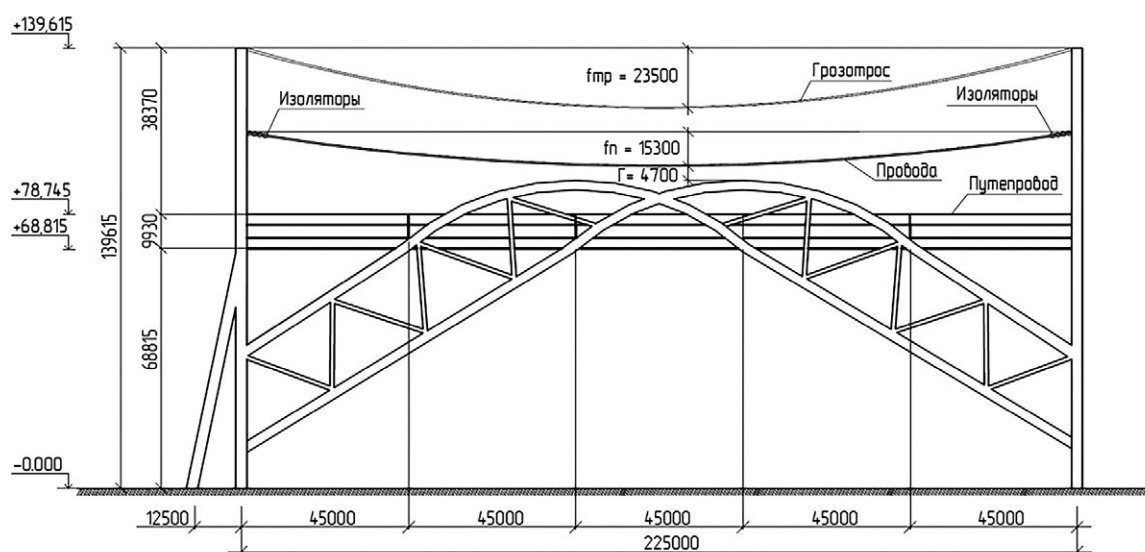


Рис. 8. Продольный вид одного пролета: четыре арки с треугольной решеткой объединяющих их связей (вариант 1)
Fig. 8. Longitudinal view of a single span: four arches with a triangular lattice of connecting links (variant 1)

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ТПУ «ГАТЧИНА»

Решение задачи оптимизации конструктивно-технологического исполнения транспортно-пересадочных узлов рассмотрено на примере большого ТПУ «Гатчина», поскольку он является наиболее нагруженным и сложным и связывает два направления магистралей: арктическое АТЭМ и ВСТМ из Санкт-Петербурга. Кроме того, в составе с ТПУ «Гатчина» на земной поверхности предусматривается расположение депо для ремонта и хранения составов.

По проведенным ранее исследованиям [4] было выяснено, что наиболее эффективным решением является кольцевая схема ТПУ, включающая кольцевой пандус для перемещения составов по ярусам и спуска в депо. В предлагаемой работе рассмотрено несколько вариантов конструирования спирального пандуса – геликоида из сталежелезобетона. В результате исследования выявлены зависимости напряженно-деформированного состояния геликоида от его геометрических параметров при помощи конечно-элементного моделирования.



Рис. 9. Общий вид ТПУ «Гатчина» радиусом 141,0 м с обходящей ВЛ 330 кВ
Fig. 9. General view of the “Gatchina” IH with a radius of 141.0 m with a 330 kV overhead line bypassing it

Согласно п. 5.3.10 СП 120.13330.2022 «Метрополитены» максимальный продольный уклон наземного участка пути не должен превышать 35‰, а поперечный уклон – 3–5‰. Задачей представленного исследования является определение оптимального значения продольного уклона.

Рассматриваются следующие варианты изменения высотной отметки при одинаковом нагружении геликоидов: $\Delta H=6$ м, $\Delta H=12$ м, $\Delta H=18$ м, $\Delta H=24$ м, ΔH – высота этажа. На Рис. 10 представлен перрон в вертикальном разрезе.

Построение аналитических моделей осуществляется в программе ЛИРА 10 методом конечных элементов (МКЭ). Колонны и конструкции покрытия условно не моделируются, закрепление пандуса осуществляется при помощи функции «установка связей в узлах». Узлы, в месте примыкания плиты к колоннам, закреплены жестко, на краях спирали разрешено перемещение вдоль направления движения.

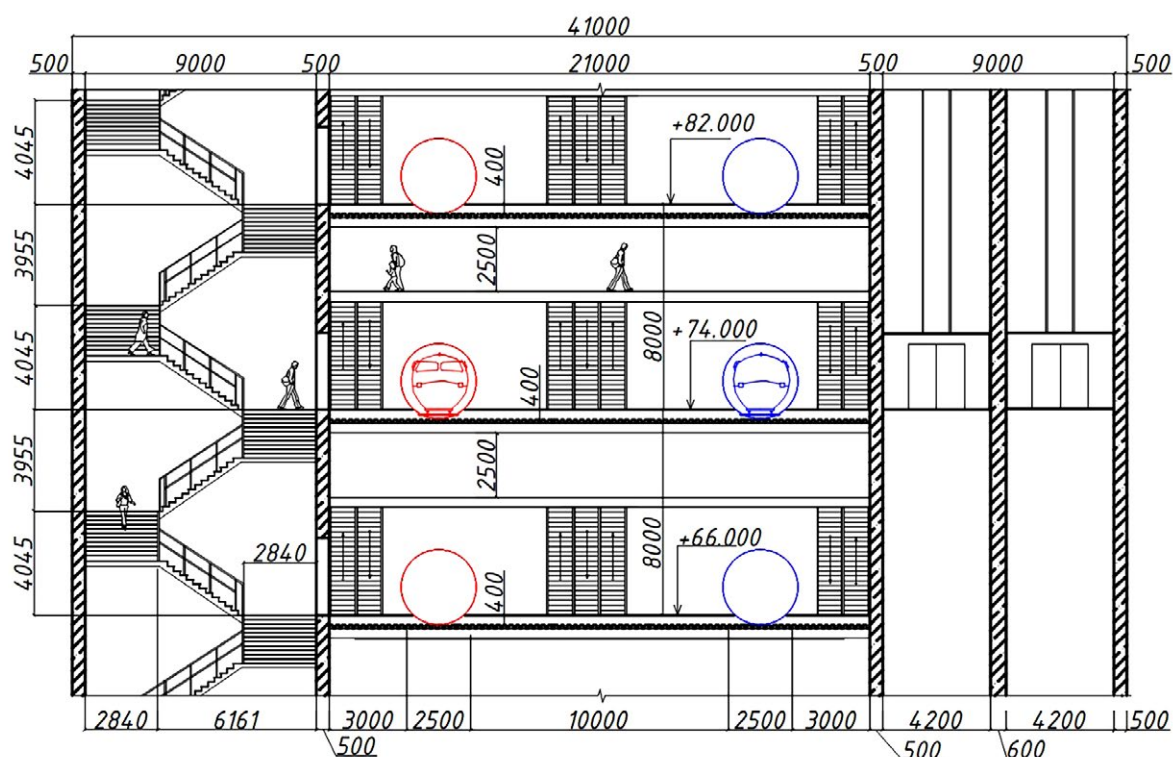


Рис. 10. Вертикальный разрез кольца здания ТПУ «Гатчина» с пассажирскими перронами, лифтовыми шахтами и лестницами при $\Delta H=8$ м (красным показано направление против часовой стрелки, синим – по часовой)

Fig. 10. Vertical section of the ring of IH “Gatchina” building with passenger platforms, elevator shafts and stairs at $\Delta H=8$ m (red shows counterclockwise direction, blue – clockwise)

Разбиение пластинчатого геликоида произведены на 4-узловые пластинчатые конечные элементы с точностью, необходимой для корректного отображения изополей. Локальные оси пластин направлены в соответствии с углами поворота.

Согласно п. 6.1 СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования» расчет выполнен в два этапа:

1. Проверка на стадии монтажа;
2. Проверка на стадии эксплуатации.

На этапе проверки конструкции на стадии монтажа проверена несущая способность профилированного листа и устойчивость его стенок от собственного веса, веса свежесуложенной бетонной смеси, технологической нагрузки от бетононасосов, веса гибкой арматуры. По результатам расчета подобран профлист Н114-750-1. Далее в рамках предлагаемого исследования рассматривается несколько вариаций исполнения участка ТПУ при расчете на стадии эксплуатации.

Анализировалась зависимость нормальных и касательных напряжений от изменения продольного уклона. По результатам расчета методом КЭ были построены графики с полиномиальной линией тренда третьего порядка. Результаты представлены на Рис. 11–14.

Значения нормальных напряжений по направлению наибольшей жесткости в диапазоне от 6 до 12 метров понижаются, далее наблюдается их рост до отметки 22 м, а потом опять спад. Наиболее низкие значения находятся в диапазоне от 7 до 18 м и далее при значениях больше 24 м.

Так, наиболее низкое значение напряжений по направлению меньшей жесткости наблюдается в диапазоне от 6 до 24 м, следовательно наиболее оптимальным будет значение из указанного диапазона.

График касательных напряжений описывается кубической параболой с точкой экстремума 14 м, парабола, описывающая значения напряжений на внешней опоре, имеет восходящие ветви. Данные результаты позволяют сделать вывод о почти одинаковых значениях касательных напряжений в точках 12 и 16 м, 10 и 18 м.

При рассмотрении нормальных напряжений по направлению наибольшей жесткости значения в диапазоне 6–12 метров (9,6–19,1%) понижаются, далее наблюдается их рост до отметки 22 м (35%), а потом – снова спад. При рассмотрении нормальных напряжений по направлению наименьшей жесткости до отметки 18 м (28,6%) наблюдается снижение значений напряжений, а далее проявляется тенденция к их росту.

Зависимость нормальных напряжений в направлении большей жесткости от высоты витка

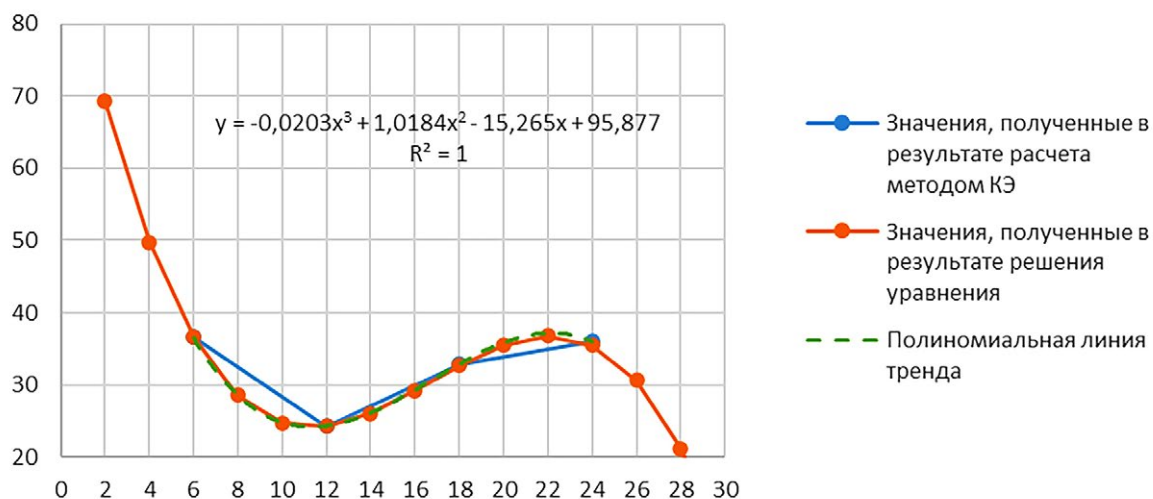


Рис. 11. График зависимости нормальных напряжений по направлению большей жесткости от высоты витка (по горизонтали)

Fig. 11. Graph of dependence of normal stresses in the direction of higher stiffness on the height of the coil (horizontally)

Зависимость нормальных напряжений в направлении наименьшей жесткости от высоты витка

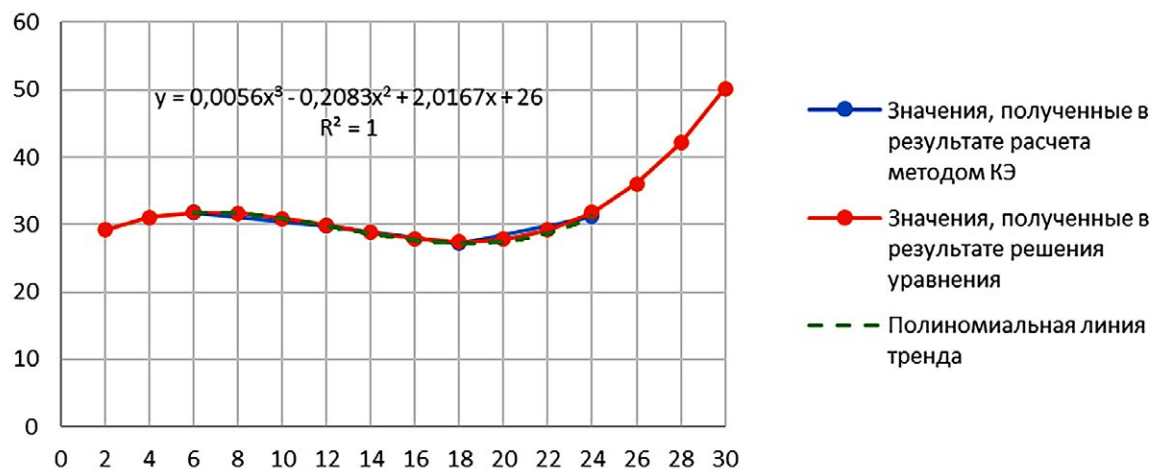


Рис. 12. График зависимости нормальных напряжений по направлению меньшей жесткости от высоты витка (по горизонтали)

Fig. 12. Graph of dependence of normal stresses in the direction of lower stiffness on the height of the coil (horizontally)

Зависимость касательных напряжений на внешней опоре от высоты витка

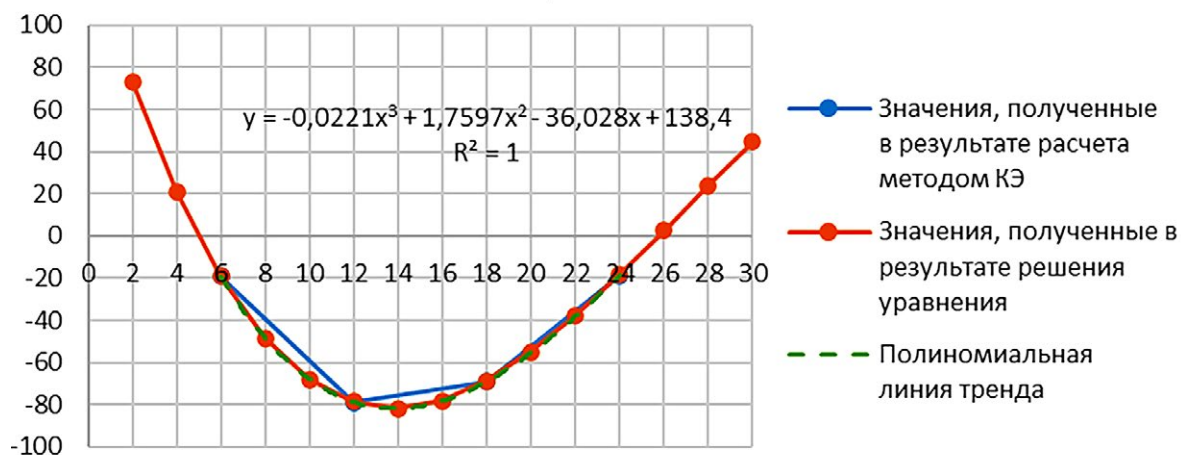


Рис. 13. График зависимости касательных напряжений на внешней опоре от высоты витка (по горизонтали)

Fig. 13. Graph of dependence of tangential stresses at the external support on the height of the coil (horizontally)

Зависимость касательных напряжений на внутренней опоре от высоты витка

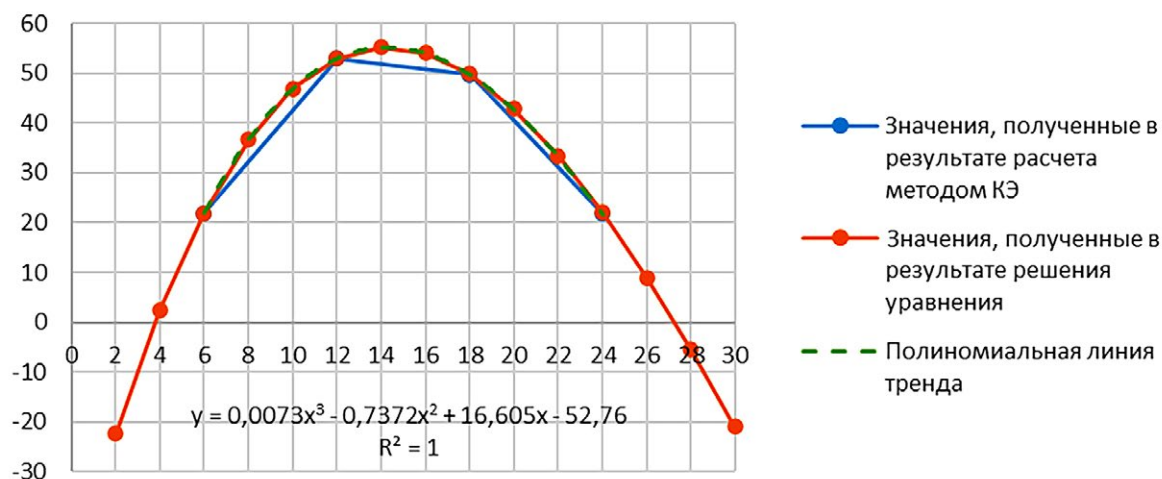


Рис. 14. График зависимости касательных напряжений на внутренней опоре от высоты витка (по горизонтали)

Fig. 14. Graph of dependence of tangential stresses on the inner support on the height of the coil (horizontally)

Графики касательных напряжений описываются кубической параболой с точками экстремума 14 м (22,3%), а парабола, описывающая напряжения на внешней опоре, имеет восходящие ветви, на внутренней – нисходящие. Данные результаты позволяют сделать вывод о равнозначности значения касательных напряжений в точках 12 и 16 м (19,1 и 25,5%), 10 и 18 м (15,9 и 28,6%).

Таким образом, для проектирования конструктивных решений ТПУ «Гатчина» приняты наиболее оптимальные значения перепада высот в интервале 7–18 м (11,14–28,6%).

ПИТАЮЩАЯ ВЛ 330 КВ «ПЕВЕК-БИЛИБИНО-ЧЕРСКИЙ»

В настоящее время продолжается строительство электростанции у арктического порта Певек, которая включает плавучую атомную теплоэлектростанцию (ПАТЭС) «Академик Ломоносов», предназначенную для тепло- и энергоснабжения отдаленных арктических прибрежных территорий. В номинальном режиме ПАТЭС способна обеспечить выдачу в береговые сети 60 МВт электроэнергии и до 50 Гкал/ч тепловой энергии для нагрева теплофикационной воды. В случае максимальной выдачи тепловой мощности (приблизительно 145 Гкал/ч), электрическая мощность, подаваемая в береговую сеть, снижается до 30 МВт. ПАТЭС способна обеспечивать электроэнергией населенный пункт с численностью до 100 000 чел. [27, 28], а также быть дополнительным источником электроэнергии для АТЭМ.

Общая протяженность ВЛ 330 кВ от порта Певек до пос. Черский составляет 754 км, причем длина первого участка от Певека до пос. Быстрый – 114 км (см. Рис. 3). Линия электропередачи подключается к АТЭМ через специализированные электрические подстанции с закрытыми распределительными устройствами.

Трасса ВЛ характеризуется весьма жесткими природно-климатическими условиями и тяжелыми для строительства горными условиями. Для одноцепной ВЛ 330 кВ приняты многогранные стальные опоры П-образного типа, которые благодаря своей аэродинамической конструктивной форме и отсутствию решетчатых элементов, характеризуются меньшими ветровыми и гололедными нагрузками по сравнению с решетчатыми опорами, что весьма актуально для жестких условий Севера Чукотки с сильными ветрами [26]. Кроме того, в связи со значительно меньшим количеством болтовых соединений такие опоры отличаются пониженными трудозатратами при сборке и установке.

Монтаж опоры в рабочее положение осуществляется путем фланцевого соединения с фундаментом. В качестве фундамента применяется труба с ответным фланцем.

Принят современный компактированный провод GZTASR 600, который, благодаря своему высокому разрывному усилию и низкому электрическому сопротивлению, является превосходным выбором для арктических условий. Высокая механическая прочность особенно важна для несения значительных гололедных и ветровых нагрузок. Кроме того, устойчивость к низким температурам и коррозионная стойкость делают его идеальным для долгосрочной эксплуатации в условиях Арктики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Предложен новый вариант Арктической транспортно-энергетической магистрали, соединяющей ключевые арктические порты на российском побережье Северного Ледовитого океана и дополнительно обеспечивающей безопасность персонала ледокольного флота Северного Морского Пути.

По предварительным расчётам расход стали составит 37,78 т на пог. м магистрали для наиболее экономичного варианта несущей конструкции пролетного строения при использовании отечественного компактированного провода GZTASR600 и треугольной решетки расположения связей на синусообразных арках. Стоимость такой конструкции предварительно составит около 4,2 млн. руб. за пог. м протяженности транспортно-энергетической магистрали.

Использование сталежелезобетона в качестве материала несущих конструкций позволит более экономично проектировать сечения конструкции транспортно-пересадочных узлов.

На основе анализа зависимости нормальных и касательных напряжений от транспортных нагрузок и продольного уклона, выявлены оптимальные значения продольного уклона пандуса транспортно-пересадочных узлов, составляющие 11,14–28,6%.

В последующих исследованиях следует рассмотреть возможность сокращения единиц ТПУ за счет прокладки тоннелей сквозь горы, а также подводного прохождения транспортно-энергетической магистрали.

Авторы заявляют, что:

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

The authors state that:

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зайцев А.А. Социализация общественного транспорта в новом технологическом укладе // Транспортные системы и технологии. 2019. Т. 5, № 3. С. 4–17. doi: 10/17816/transsyst2019534-17
2. Международная конференция «Трансконтинентальная магистраль Евразия-Америка через Берингов пролив». Forum International. 2007. № 7. Дата обращения: 30.10.2022. Режим доступа: https://larouchepub.com/eiw/public/2007/2007_20-29/2007-24/pdf/forum_7.pdf
3. РАН предложила Путину проект железной дороги через Сибирь // Газета «Взгляд». 23.03.2015. Дата обращения: 30.10.2022. Режим доступа: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=137215>
4. 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
5. Зайцев А.А. Инновации как способ решения глобальных задач // РЖД-Партнер. 2018. № 13–14. С. 35. Дата обращения: 30.10.2022. Режим доступа: <https://flotprom.ru/%D0%E6%E4%EF%E0%F0%F2%ED%E5%F0%C6%F3%F0%ED%E0%EB/>
6. Антонов Ю.Ф., Зайцев А.А. Магнитолевитационная транспортная технология / под ред. В.А. Гапановича. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014.
7. Лаппо Г.М. Города России. Взгляд географа. М.: Новый хронограф, 2012.
8. Медведев Н.Е. Варианты конструктивных решений надземных сооружений высоко- и сверхскоростной транспортной систем. В кн.: 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. Дата обращения: 30.10.2022. Режим доступа: <https://www.spbgasu.ru/science/sborniki-trudov-konferentsiy-spbgasu-i-monografii/sborniki-trudov-konferentsiy-i-monografii-za-2017-g/>
9. Якуненкова М.С. Транспортный хаб как тип общественного комплекса. Функциональные элементы транспортного хаба. В кн.: Архитектура –

- строительство – транспорт: материалы 72-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета. Ч. 1. СПбГАСУ. СПб, 2019. С. 185–189. EDN: YOIEYZ
10. Андреев Д.М., Большихшапок И.С. Предложения по строительству эстакадных конструкций и транспортно-пересадочных узлов высокоскоростной магистрали от Гатчины до Санкт-Петербурга. В кн.: Магистратура – транспортной отрасли. Материалы VI Всероссийской межвузовской конференции «Магистерские слушания». 21–22 октября 2021 г. СПбГАСУ. СПб, 2022. С. 9–22. EDN: RZPSCN
 11. Вакуленко С.П., Евреенова Н.Ю. Техническое оснащение и технология работы транспортно-пересадочных узлов, формируемых с участием железнодорожного транспорта. М.: МИИТ, 2015.
 12. Terentyev Yu.A., Filimonov V.V., Malinetskiy G.G., et al. Russia Integrated Transit Transport System (ITTS) Based on Vacuum Magnetic Levitation Transport (VMLT). *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(3):57–84. doi: 10.17816/transsyst201843s157-84
 13. Kim K.K. The Russian Version of the Transport System “Hyperloop”. *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(2):73–91. doi: 10.17816/transsyst20184273-91
 14. Musk E. Hyperloop Alpha. Texas: SpaceX [cited 2019 July 28]. Available from: https://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha-20130812.pdf
 15. Федорова М.В. Скоростной городской транспорт для современной агломерации // *Транспортные системы и технологии*. 2015. Т. 1, № 1. С. 26–36. doi: 10.17816/transsyst20151126-36
 16. Талашкин Г.Н. Особенности проектирования и строительства Маглев-дорог для грузовых перевозок // *Транспортные системы и технологии*. 2016. Т. 2, № 2. С. 53–56. doi: 10.17816/transsyst20162253-56
 17. Patent USA US5950543 (A). Oster D. inventor. Evacuated tube transport. 1999 Sept. 14. Available from: <https://patents.google.com/patent/US5950543A/en>
 18. Постановление правительства Санкт-Петербурга от 30 июня 2014 года N 552 “О государственной программе Санкт-Петербурга «Развитие транспортной системы Санкт-Петербурга». Дата обращения: 20.07.2023. Режим доступа: https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/c_transport/gosudarstvennaya-programma-sankt-peterburga-razvitie-transportnoj-sist/
 19. Комитет по развитию транспортной инфраструктуры Санкт-Петербурга. «Концепция развития транспортной системы Санкт-Петербурга». Дата обращения: 20.07.2023. Режим доступа: <https://krti.gov.spb.ru/dorozhnyj-kompleks/koncepciya-razvitiya-transportnoj-sistemy-sankt-peterburga/>
 20. Плешко М.С., Павленко Д.Г., Абдулманафов Г.Б., Кешабян Р.В. Перспективы развития мирового тоннелестроения и транспортного строительства // *Теория и практика современной науки*. 2018. №1(31). С. 406–408. Дата обращения: 20.07.2023. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-razvitiya-mirovogo-tonnelestroeniya-i-transportnogo-stroitelstva>
 21. Mahmoodzadeh A., Mohammadi M., Daraei A., et al. Forecasting tunnel geology, construction time and costs using machine learning methods // *Neural Comput & Applic*. 2021. Vol. 33. P. 321–348. doi: 10.1007/s00521-020-05006-2

22. Cheng R., Chen W., Hao H., Li J. A state-of-the-art review of road tunnel subjected to blast loads // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021. [cited 20.07.2023]. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103911>
23. Yu G., Wang Y., Mao Z., et al. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating // *Trenchless Technology Research*. 2021. doi: 10.1016/j.tust.2021.104125
24. Особенности проектирования и строительства в арктическом регионе. Дата обращения: 15.11.2023. Режим доступа: http://zvt.abok.ru/articles/521/Osobennosti_proektirovaniya_i_stroitelstva_v_arkticheskom_regiоне?ysclid=lp3xz2mf6d433667185
25. Строительство в высоких широтах. Принципы, возможности и перспективы. Дата обращения: 05.01.2024. Режим доступа: <https://ardexpert.ru/article/5072>
26. Азаренкова З.В. Планировочная организация транспортно-пересадочных узлов // *Academia. Архитектура и строительство*. 2011. № 1. С.76–80. EDN: OOEUX
27. Безверхая Е.П., Скопинцев А.В. Функционально-типологические модели в архитектуре интермодальных транспортно-пересадочных узлов // *Architecture and Modern Information Technologies*. 2019. №3(48). С. 135–147 Дата обращения: 05.01.2024. Режим доступа: https://marhi.ru/AMIT/2019/3kvart19/PDF/10_bezverhaja.pdf
28. Власов Д.Н. Методика формирования системы транспортно-пересадочных узлов в пригородной зоне агломерации // *Вестник евразийской науки*. 2013. № 4 (17). С. 1–10. Дата обращения: 05.01.2024. Режим доступа: <https://naukovedenie.ru/metodika-forirovaniya-sistemy-transportno-peresadochnyh-uzlov-v-prigorodnoy-zone-aglomeratsii.pdf>

REFERENCES

1. Zaitsev AA. Socialization of public transport in the new technological mode. *Transport systems and technologies*. 2019;5(3):4–17. (In Russ.) doi: 10.17816/transsyst2019534-17
2. International Conference “Intercontinental Eurasia-America Transport Link via Bering Strait”. *Forum International*. 2007;(7):1–80. (In Russ.) [cited 05.01.2024]. Available from: https://larouchepub.com/eiw/public/2007/2007_20-29/2007-24/pdf/forum_7.pdf
3. RAS offered Putin the project of a railroad through Siberia. *Vzglyad newspaper*. 23.03.2015 (In Russ.) [cited 05.01.2024]. Available from: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=137215>
4. Senkin NA, Andreev DM, Vasiliev VS. Proposals for the creation of high-speed transport highways in the Arctic zone: designs and technologies. *Innovative transport systems and technologies*. 2023;9(1):44–63. (In Russ.) doi: 10.17816/transsyst20239144-63
5. Zaitsev AA. Innovatsii kak sposob reshenia globalnykh zadach. *RZD-PARTNER*. 2018;13-14:35. (In Russ.) [cited 05.01.2024]. Available from: <https://flotprom.ru/%D0%E6%E4%EF%E0%F0%F2%ED%E5%F0%C6%F3%F0%ED%E0%EB/>

6. Antonov YuF, Zaitsev AA. *Magnitolevitatsionnaia transportnaia tekhnologiia*. Moscow: FIZMATLIT; 2014. (In Russ.)
7. Lappo GM. *Goroda Rossii. Vzglyad geografa*. Moscow: Novyj khronograf; 2012. (In Russ.)
8. Medvedev NE. Varianty konstruktivnykh reshenij nadzemnykh sooruzhenij vysokoi sverhskorostnoj transportnoj system. In “*Aktual’nye problemy stroitel’sstva*” *Materialy 70-j Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenykh* St. Petersburg: GASU; 2017:240–244 (In Russ.) [cited 05.01.2024]. Available from: <https://www.spbgasu.ru/science/sborniki-trudov-konferentsiy-spbgasu-i-monografii/sborniki-trudov-konferentsiy-i-monografii-za-2017-g/>
9. Yakunenkova MS. Transportnyj hab kak tip obshchestvennogo kompleksa. In: *Funkcional’nye elementy transportnogo haba. In Aktual’nye problemy stroitel’sstva. Materialy 72-j Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenykh* St-Petersburg: GASU; 2019;185–189 (In Russ.) EDN: YOIEYZ
10. 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; 2022:9–22 (In Russ.)]. EDN: RZPSCN
11. Vakulenko SP, Evreenova NYu. Tekhnicheskoe osnashchenie i tekhnologiya raboty transportno-peresadochnykh uzlov, formiruemykh s uchastiem zheleznodorozhnogo transporta: Uchebnoe posobie. Moscow: MIIT; 2015. (In Russ.)
12. 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
13. Kim KK. The Russian Version of the Transport System “Hyperloop”. *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(2):73–91. doi: 10.17816/transsyst20184273-91
14. Musk E. *Huperloop Alpha*. Texas: SpaceX [cited 2019 July 28]. Available from: https://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha-20130812.pdf
15. Fedorova MV. Speed urban transport for modern agglomeration. *Transportation Systems and Technology*. 2015;1(1):26–36. (In Russ.) doi: 10.17816/transsyst20151126-36
16. 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
17. Patent USA US5950543 (A). Oster D., inventor. Evacuated tube transport. 1999 Sept. 14. Available from: <https://patents.google.com/patent/US5950543A/en>
18. Postanovlenie pravitel’sтва Sankt-Peterburga ot 30 iyunya 2014 goda N 552 “O gosudarstvennoj programme Sankt-Peterburga “Razvitie transportnoj sistemy Sankt-Peterburga”. (In Russ.) [cited 05.01.2024]. Available from: https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/c_transport/gosudarstvennaya-programma-sankt-peterburga-razvitie-transportnoj-sist/

19. Komitet po razvitiyu transportnoj infrastruktury Sankt-Peterburga. “Konceptiya razvitiya transportnoj sistemy Sankt-Peterburga”. (In Russ.) [cited 05.01.2024]. Available from: <https://krti.gov.spb.ru/dorozhnyj-kompleks/konceptiya-razvitiyatransportnoj-sistemy-sankt-peterburga/>
20. Pleshko MS, Pavlenko DG, Abdulmanafov GB, Keshabyan RV. Prospects for the development of global tunneling and transport. *Theory and practice of modern science*. 2018;1(31):406–408. (In Russ.) [cited 05.01.2024]. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-razvitiya-mirovogo-tonnelestroeniya-i-transportnogo-stroitelstva>
21. Mahmoodzadeh A, Mohammadi M, Daraei A, et al. Forecasting tunnel geology, construction time and costs using machine learning methods. *Neural Comput & Applic*. 2021;33:321–348. doi: 10.1007/s00521-020-05006-2
22. Cheng R, Chen W, Hao H, Li J. A state-of-the-art review of road tunnel subjected to blast loads. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021. doi: 10.1016/j.tust.2021.103911
23. Yu G, Wang Y, Mao Z, et al. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating. *Trenchless Technology Research*. YK; 2021. doi: 10.1016/j.tust.2021.104125
24. Features of design and construction in the Arctic region. (In Russ.) [cited 05.01.2024]. Available from: http://zvt.abok.ru/articles/521/Osobennosti_proektirovaniya_i-stroitelstva_v_arkticheskom_regone?ysclid=lp3xz2mf6d433667185
25. Building in high latitudes. Principles, opportunities and perspectives. (In Russ.) [cited 05.01.2024]. Available from: <https://ardexpert.ru/article/5072>
26. Azarenkova ZV. Planning organization of transport hubs. *Academia. Architecture and construction*. 2011;1:76–80 (In Russ.) EDN: OOEUOX
27. Bezverkhaya EP, Skopintsev AV. Functional and typological models in the architecture of intermodal transport hubs. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2019;3(48):135–147 (In Russ.) [cited 05.01.2024]. Available from: https://marhi.ru/AMIT/2019/3kvart19/PDF/10_bezverhaja.pdf
28. Vlasov DN. Methodology for forming a system of transport hubs in a suburban agglomeration zone. *Bulletin of Eurasian Science*. 2013;4(17):1–10. (In Russ.) [cited 05.01.2024]. Available from: <https://naukovedenie.ru/metodika-forirovaniya-sistemy-transportno-peresadochnyh-uzlov-v-prigorodnoy-zone-aglomeratsii.pdf>

Сведения об авторах:

Сенькин Николай Александрович, кандидат технических наук, доцент;

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

E-mail: senkin1952@yandex.ru

Закарлюкина Виктория Михайловна, бакалавр;

eLibrary SPIN: 8343-7785; ORCID: 0009-0002-6307-7155

E-mail: vikto.0152@gmail.com

Давидюк Эвелина Витальевна, бакалавр;

ORCID: 0009-0002-2290-7300

E-mail: evellinav17@gmail.com

Ли Павел Андреевич, бакалавр;

ORCID: 0009-0004-5730-8038

E-mail: leeprav@mail.ru

Большихшапок Иван Сергеевич, магистр;

eLibrary SPIN: 2663-7758; ORCID: 0000-0001-6868-4312

E-mail: i.bshapok@yandex.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

Victoria M. Zakarlyukina, Bachelor of Science.

eLibrary SPIN: 8343-7785; ORCID: 0009-0002-6307-7155

E-mail: vikto.0152@gmail.com

Evelina V. Davidyuk, Bachelor of Science;

ORCID: 0009-0002-2290-7300

E-mail: evellinav17@gmail.com

Pavel Andreevich Li, Bachelor of Science;

ORCID: 0009-0004-5730-8038

E-mail: leeprav@mail.ru

Ivan S. Bolshikhshapok, Master of Science;

eLibrary SPIN: 2663-7758; ORCID: 0000-0001-6868-4312

E-mail: i.bshapok@yandex.ru