

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление - Транспортные и транспортно-логистические системы

УДК [UDC] 624.21.037:624.014.2:625.41

DOI 10.17816/transsyst20195473-95

© Н. А. Сенькин^{1,2}, А. С. Филимонов¹, К. Е. Харитонов¹,
В. В. Яковлев¹, Е. О. Бондарева¹, М. В. Меркулова¹, Н. Е. Медведев¹

¹Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

(Санкт-Петербург, Россия)

²АО «Научно-технический центр Федеральной сетевой компании

Единой Энергетической системы»

(Москва – Санкт-Петербург, Россия)

К ВОПРОСУ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ МАГИСТРАЛИ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ

В рамках студенческих исследований в Санкт-Петербургском архитектурно-строительном университете разрабатываются альтернативные предложения по созданию окружной высокоскоростной магистрали (ВСТМ) общей протяженностью 147,2 км. Схема предложена в виде многоугольника с ТПУ в узлах и состоит из трех основных частей: 1 – надземной (62,6 км), 2 – надводной (29,6 км) и 3 – наземно-подземной (55,0 км). Основные пути размещены в четырехтрубной стальной балке, каждая труба которой организована по технологии вакуумного трубного транспорта с давлением 10 % от нормального для высокоскоростного движения пассажирских поездов на магнитно-левитационной подушке при помощи линейного тягового двигателя (технология Maglev). Рельсовое основание колеи 1520 мм расположено по всей длине пути, как на стоянках, зонах разгона и торможения, так и на основных скоростных участках для движения с максимальной скоростью 500 км в час.

Основным направлением исследований явилась разработка несущих конструкций, обеспечивающих необходимую функциональность, надежность и безопасность ВСТМ. В целях снижения шумового воздействия на мегаполис, преодоления многочисленных искусственных и естественных препятствий, повышения антитеррористической защищенности основной уровень рельсового пути для надземной и надводной конструкции принят на отметке +88,00 в Балтийской системе высот. Выполнены расчеты вариантов с определением внутренних сил в элементах и перемещений узлов с использованием программного комплекса “SCAD Office 21.1”. при учете полного комплекса нагрузок с учетом динамических воздействий и нелинейности. Выполнен подбор сечений элементов по методике предельных состояний по действующим нормам. Показано преимущество арочно-вантового варианта с пролетом 360 м по прочности, устойчивости, жесткости и вертикальному размеру (высоте опор).

Продолжение научно-исследовательских и проектных работ по данной теме должно привести к появлению окружной высокоскоростной транспортной системы на границах связи Санкт-Петербурга и Ленинградской области с пассажиропотоком, вполне сопоставимым с линией метрополитена.

Обоснование: В официальной «Концепции развития транспортной системы Санкт-Петербурга» рассматривается ряд сложных транспортных проблем на границах связи территорий Санкт-Петербурга и Ленинградской области, а именно: недостаточное развитие метрополитена и скоростного трамвая, отсутствие сети транспортно-пересадочных узлов, наличие многочисленных барьеров (железные дороги, парки, реки и каналы и т.п.), исчерпание пропускной способности входных автомагистралей, наличие высокой плотности застройки. На практике проектирование и строительство городских и пригородных автомобильных магистралей в транспортной политике Санкт-Петербурга имеет приоритетное развитие, приводя к дополнительным экологическим потерям.

Цель: разработка окружной высокоскоростной транспортной системы на границах связи Санкт-Петербурга и Ленинградской области с пассажиропотоком, сопоставимым с линией метрополитена.

Материалы и методы: С использованием программного комплекса "SCAD Office 21.1" рассчитаны эстакадные конструкции на сочетании действующих нагрузок, сил и воздействий, включая учет динамических аспектов и нелинейности, а также выбор сечений элементов методом предельных состояний. Для определения оптимальных эстакадных конструкций скоростных транспортных магистралей, а именно высотных и длинномерных металлоконструкций, поддерживающих балку путепровода, проведены расчеты с подбором поперечных сечений для четырех вариантов вантово-стержневых систем (арочно-вантовая; вантово-стержневая с наклонными вантами и стальными решетчатыми пилонами; то же, со стальными трубобетонными пилонами; вантово-стержневая система с подвесками по патенту US5950543 (A)).

Результаты: По результатам вариантного проектирования принят арочно-вантовый вариант с пролетом 360 м по критерию металлоемкости, при этом расход стали составил 20,9 тонн на 1 м длины магистрали. Из приближенного расчета следует, что стоимость строительства магистрали на земных участках (двухпутная схема) по сравнению со строительством метрополитена ожидается в 5-6 раз ниже, а на морских участках – в 3-4 раза ниже за счет высоких пилонов и глубоких свайных фундаментов.

Заключение: расчетный объем пассажироперевозок за сутки для четырехпутной высокоскоростной магистрали составит 280 тыс. пассажиров, а в год – 102 млн. пассажиров, который вполне сопоставим с данным показателем для линии метрополитена.

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 – Transport and Transport & Logistics Systems

© N. A. Senkin^{1,2}, A. S. Filimonov¹, K. E. Kharitonov¹, V. V. Yakovlev¹,
E. O. Bondareva¹, M. V. Merkulova¹, N. E. Medvedev¹¹Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering
(St. Petersburg, Russia)²JSC "Scientific and Technical Center of the Federal Grid Company
of the Unified Energy System"
(Moscow – St. Petersburg, Russia)**ON THE CREATION OF A HIGH-SPEED TRANSPORT
HIGHWAY IN ST. PETERSBURG**

As part of student research at the St. Petersburg University of architecture and construction, alternative proposals are being developed for the creation of a circumferential high-speed highway with a total length of 147.2 km. The scheme is proposed in the form of a polygon with HUB in the nodes and consists of three main parts: 1 – above-ground (62.6 km), 2 – above-water (29.6 km) and 3 – surface-underground (55.0 km). The main tracks are located in a four-tube steel beam, each tube of which is organized by the technology of vacuum tube transport with a pressure of 10 % of the normal for high-speed passenger trains on a magnetic levitation cushion using a linear traction motor (Maglev system). The rail base of the 1520 mm gauge is located along the entire length of the track, both in parking lots, acceleration and braking zones, and on the main high-speed sections for movement with a maximum speed of 500 km per hour.

The main direction of research was the development of load-bearing structures that provide the necessary functionality, reliability and safety of structures. In order to reduce the noise impact on the metropolis, overcome numerous artificial and natural obstacles, improve anti-terrorist protection, the main level of the rail track for the above-ground and above-water structures was adopted at +88.00 in the Baltic elevation system. Calculations of variants with determination of internal forces in elements and movements of nodes with use of the program complex "SCAD Office 21.1" are executed, when accounting for the full range of loads taking into account dynamic effects and non-linearity. The selection of cross-sections of elements according to the method of limit states according to the current norms is carried out. The advantage of the arch-cable-stayed variant with a span of 360 m in strength, stability, stiffness and vertical size (height of supports) is shown.

The continuation of research and design work on this topic should lead to the emergence of a district high-speed transport system at the borders of communication between St. Petersburg and the Leningrad region with passenger traffic, quite comparable to the metro line.

Aim: To develop a district high-speed transport system at the borders of St. Petersburg and Leningrad region with passenger traffic comparable to the metro line.

Materials and Methods: Using the software package "SCAD Office 21.1", the trestle structures are calculated for the combination of operating loads, forces and influences, including the consideration of dynamic aspects and nonlinearity, as well as the selection of cross-sections of elements by the method of limit states. To determine the optimal trestle structures of high-speed highways, namely high-rise and long-length metal structures supporting the overpass beam, calculations with the selection of cross sections of four variants of cable-stayed systems (arch-cable-stayed; cable-stayed rod with inclined cables and steel

lattice pylons; the same, steel pipe-concrete pylons; cable-stayed rod system with suspensions according to the patent US5950543 (A).

Results: the results of the trial design adopted arch-cable option with a span of 360 m according to the criterion of metal consumption, the consumption of steel amounted to 20.9 tons per 1 m length of highway.

Conclusion: the estimated volume of passenger traffic per day for the four-track high-speed line will be 280 thousand passengers, and 102 million passengers per year, which is quite comparable to this figure for the metro line.

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

ВВЕДЕНИЕ

Современная Концепция развития пассажирской транспортной системы Санкт-Петербурга, утвержденная постановлением правительства города от 30.06.2014 № 552 «О государственной программе Санкт-Петербурга «Развитие транспортной системы СПб», определяет основные цели и задачи развития [1, 2]. В частности, приведен целый ряд сложных транспортных проблем на границах связи территорий Санкт-Петербурга и Ленинградской области, а именно: недостаточное развитие метрополитена и скоростного трамвая, отсутствие развернутой сети транспортно-пересадочных узлов (ТПУ), наличие множества естественных и искусственных преград (железные дороги, парки, реки и каналы), исчерпание пропускной способности “входных” автомагистралей, наличие высотной плотной застройки и т.п. Указанные проблемы предполагается решить посредством развития двухуровневой транспортной схемы, включающей внеуличную скоростную, преимущественно рельсовую (метрополитен), и подводящую к ней систему наземного городского и пригородного пассажирского транспорта. На практике проектирование и строительство городских и пригородных автомобильных магистралей в транспортной политике Санкт-Петербурга имеет приоритетное развитие (например, Западный и Восточный скоростные диаметры), приводя к дополнительным экологическим потерям [3].

Вышеуказанные проблемы также возникают и по причине формирования городской моноцентрической агломерации вокруг крупного города-ядра, каковым является многомиллионный Санкт-Петербург. В настоящее время отдаление места работы и жительства приводит к росту автомобилизации населения, увеличению транспортных потоков и “запиранию” городских улиц и дорог [4]. С целью решения проблем мегаполиса, приводящих к системному градостроительному кризису, угрожающему экологической безопасности, авторы настоящей статьи предлагают максимально отказаться от использования автотранспорта,

особенно в центральной части Санкт-Петербурга, перейдя на экологически чистый городской электрифицированный скоростной транспорт, преимущественно на основе магнитной левитации [5, 6]. При этом выход видится в дальнейшем повышении скорости и комфортности общественного транспорта, приближении его остановок к станциям метро, минимизации протяженности внутренних переходов, возведении ТПУ и более крупных мультимодальных транспортно-пересадочных комплексов.

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 разработки альтернативных предложений по созданию окружной высокоскоростной транспортной магистрали (ВСТМ), допускающей движение пассажирских электропоездов максимальной скоростью 500 км в час и более с применением технологий Маглев и ЕТТ (Evacuated Tube Transportation) [7–11]. Пусть будет имя поездам «Роса».

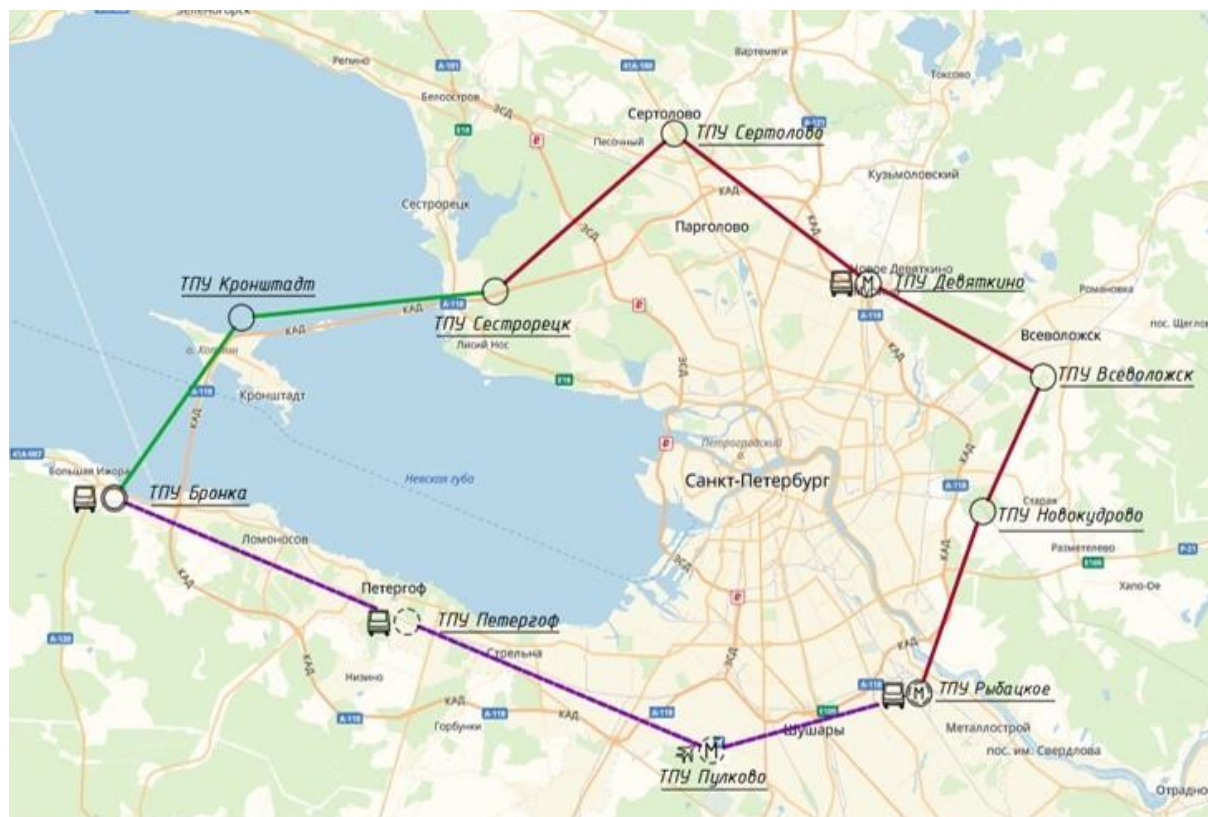
Из многолетнего опыта компании Transrapid по возведению коммерческих пассажирских Маглев-линий известно, что затраты на строительство инфраструктуры могут составить до 60–80 % от общих затрат [12]. Поэтому основным направлением авторских исследований стала разработка схемы ВСТМ, а также конструктивной основы магистрали, в частности высотных и большепролетных несущих конструкций, преимущественно эстакадного исполнения, обеспечивающих требуемую функциональность транспортной системы, надежность конструкций, безопасность для человека и экологии мегаполиса.

ПРЕДЛАГАЕМАЯ СХЕМА МАГИСТРАЛИ

Общая схема ВСТМ длиной 147,2 км предложена в виде многоугольника с прямыми перегонами, с ТПУ в углах и состоит из трех участков (Рис. 1): 1 – северный надземный «Сестрорецк – Сертолово – Девяткино – Всеволожск – Новокудрино (Янино) – Рыбацкое» (62,6 км), 2 – морской надводный «Бронка (Ижора) – Кронштадт – Сестрорецк» (29,6 км) и 3 – наземно-подземный «Рыбацкое – Пулково – Петергоф – Бронка (Ижора)» (55,0 км).

Предлагаемая ВСТМ обеспечивает удобные, быстрые и безопасные высокоскоростные транспортные связи мегаполиса с пригородами и близлежащими поселениями Ленобласти. В связи с высотным регламентом и ограничениями со стороны аэропорта «Пулково» в качестве альтернативных вариантов на 3 участке возможно применение высокоскоростных наземных электропоездов (на основе Маглев-технологии) и скоростного трамвая, идущего от станций метрополитена

Рыбацкое и Шушары до аэропорта Пулково. ВСТМ 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.



Условные обозначения:

- | | | |
|------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| — Северный (ввод в 2030 г.) | ○ Надземный ТПУ | М Станция метрополитена |
| — Подземный (ввод в 2040 г.) | ○ Подземный ТПУ | Железнодорожная станция |
| — Морской (ввод в 2050 г.) | ○ Надземно-подземный ТПУ | Аэропорт |

Рис. 1. Предлагаемая высокоскоростная транспортная магистраль в Санкт-Петербурге

Несомненно, предлагаемая схема представляет эскизный вариант организации высокоскоростного пассажирского сообщения, но, тем не менее позволяет ориентировочно оценить его эффективность. Длина каждой транспортной прямой линии между станциями ВСТМ, размещаемыми в ТПУ, принята в интервале 10–22 км, что позволит высокоскоростному поезду «Роса» преодолевать каждый перегон всего за несколько минут. ВСТМ обеспечит высокоскоростное окружное перемещение пассажиров как с севера на юг, так и с запада на восток и обратно, минуя основные транспортные пути мегаполиса и проходя над высотной плотной застройкой. Например, продолжительность переезда от

ТПУ «Сестрорецк» до ТПУ «Рыбацкое», расположенных на схеме диаметрально, составит не более 20 минут.

ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДОЧНЫЕ УЗЛЫ

Местоположения ТПУ назначены в местах перехвата приходящих из Ленинградской области автомагистралей и в максимальной близости к существующим (Девяткино, Рыбацкое) и перспективным (например, Пулковое, Новокудрово) станциям метрополитена.

Высотное многофункциональное здание ТПУ включает зоны посадки и высадки пассажиров, зоны транзита и ожидания, зоны рекреации и пребывания пассажиров, кассовые, лифтовые и лестничные зоны, санитарно-технические помещения, зоны эскалаторов, траволаторов, переходов и пересадок, зоны связи со станциями и остановками пригородного, городского транспорта, включая метрополитен [8–10]. В таком многоэтажном здании вполне возможным представляется размещение офисных, учебных, гостиничных, спортивных, торговых, культурно-развлекательных, складских и производственных помещений, включая стоянки для автомобилей и даже вертолетов.

Например, здание ТПУ «Кронштадт» запроектировано как многоэтажный небоскреб, обеспечивающий подвеску путепровода на достаточной высоте с отметкой +88,00 БСВ (Балтийская система высот), что гарантирует прохождение над судоходной акваторией Финского залива. Здание расположено на рукотворном полуострове, намытом на Котлинской отмели, огражденном контурной дамбой и примыкающем к острову Котлин и Кольцевой автодороге (КАД) с северо-западной стороны (Рис. 2). Помимо функционала ТПУ территория намывного полуострова благоприятна для размещения объектов отдыха (открытые и закрытые водные комплексы, пляжи, спортивные сооружения), социально-бытовых, транспортно-перегрузочных и зеленых зон и т.п. По высоте здание разделено на следующие функциональные ярусы: нижний с остановками общественного транспорта, автостоянками, кассовыми зонами, лифтовыми площадками; выше до отметки скоростной магистрали – зоны коммунально-бытового, торгового и культурно-просветительского назначения, офисы; выше платформы – офисная и даже жилая зоны [9].

На конструктивной схеме участка ВСТМ, построенной по варианту с применением арочных эстакад, обозначены основные его функциональные компоненты (Рис. 3). Здесь представлено П-образное здание ТПУ «Девяткино», надстраиваемое над существующими совмещенными одноименными железнодорожной станцией и наземной станцией метрополитена [10].

Представленные ТПУ рекомендуется выполнить в виде зданий со стальным либо сталежелезобетонным рамным каркасом с опиранием на трубобетонные свай-оболочки глубокого заложения.



Рис. 2. Транспортно-пересадочный узел “Кронштадт” на намывном полуострове

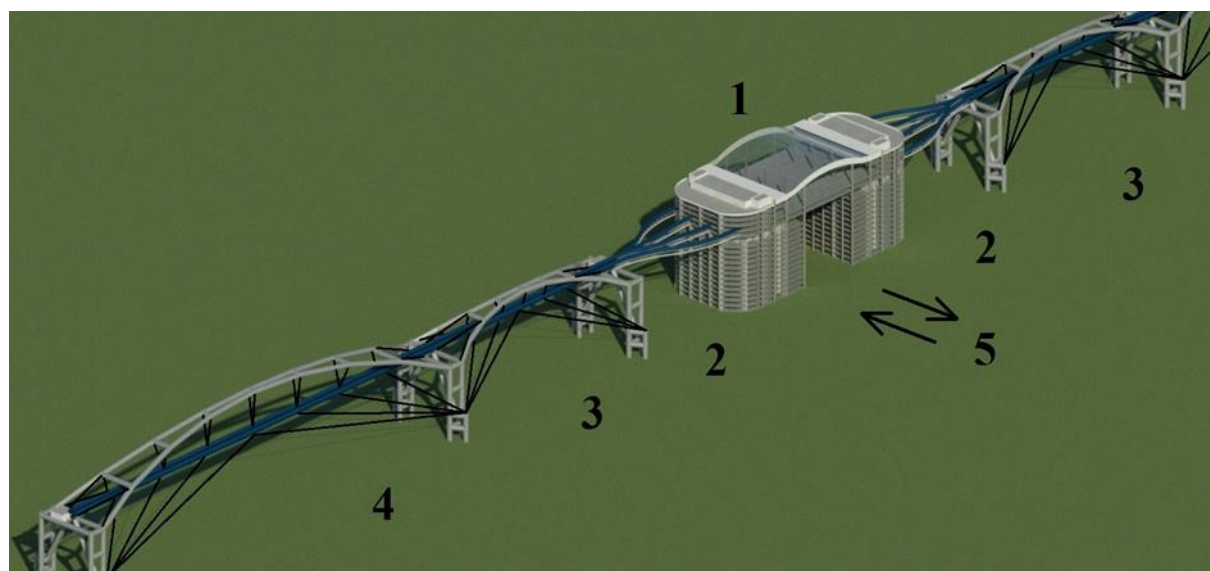


Рис. 3. Основные функциональные зоны высокоскоростной магистрали:

- 1 – здание ТПУ с пассажирскими платформами;
- 2 – зона входа-выхода путепровода;
- 3 – зона остановки состава в путепроводе;
- 4 – зона разгона-торможения состава;
- 5 – направления движения пассажирского городского транспорта

Многоэтажные ТПУ, объединяемые с объектами социальной, сервисной и торгово-развлекательной инфраструктуры, представляют собой архитектурные высотные доминанты в районах мегаполиса. Такие ТПУ, в частности, рассматриваемые в настоящей статье, по определению следует отнести к транспортно-пересадочным комплексам (ТПК), обеспечивающим более высокий уровень комфорта и транспортного обслуживания пассажиров [13].

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МАГИСТРАЛИ

На Рис. 3 представлены основные конструктивные компоненты ВСТМ, относящиеся к следующим функциональным зонам: 1 – зона с платформами для посадки-высадки пассажиров и поворота путей (здание ТПУ); 2 – зона входа-выхода путепровода в здание ТПУ; 3 – зона стоянки состава в путепроводе со шлюзовыми клапанами по концам, снабженная вакуумными насосами и компрессорами; 4 – зона разгона-торможения состава; 5 – направления движения городского и пригородного пассажирского транспорта, включая метрополитен и пригородные поезда. Посредством указанных компонентов обеспечивается работоспособность функциональных зон ВСТМ, характеризующихся как уровнем давления воздуха во внутренней полости труб путепровода, так и соответствующим скоростным режимом движения составов. Путепровод для высокоскоростных поездов “Роса” принимается четырехпутным, включая обратное направление.

Рис. 4 иллюстрирует конструктивно-технологическую схему ВСТМ на прямолинейном участке – перегоне между станциями ТПУ «Девяткино» и ТПУ «Всеволожск» общей протяженностью 12,5 км, так же составленную из большепролетных арочных эстакад, обеспечивающих надежную и безопасную подвеску балки путепровода. Здесь представлен график скоростного движения состава, иллюстрирующий равноускоренный процесс набора скорости V с ускорением $a = 4,63 \text{ м/с}^2$ ($0,47g$) в течение 0,5 мин. до максимальной скорости $V_{max} = 500 \text{ км/ч}$ и аналогично - снижения скорости. При этом протяженность зоны разгона для высокоскоростного варианта составляет 2,1 км и аналогично – зоны торможения. Расчетная продолжительность этапа № 1 (посадка пассажиров в вагоны состава на платформе ТПУ на станции отправления и его перемещения в зону стоянки в трубном путепроводе) назначена равной 0,5 мин., как и продолжительность следующего этапа № 2 (откачка воздуха до требуемого давления в трубе путепровода) – 0,5 мин. Аналогично назначены условия для второго ТПУ (станция прибытия): восстановление атмосферного давления в трубе – 0,5 мин., въезд на платформу в ТПУ и высадка пассажиров – 0,5 мин.

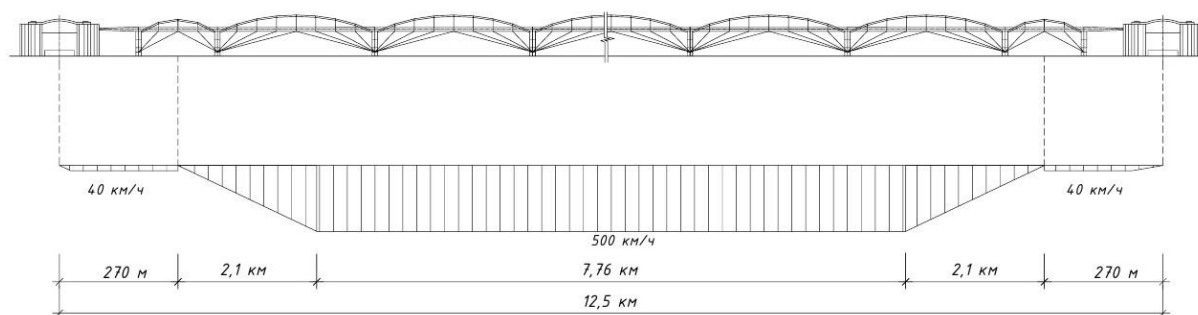


Рис. 4. Конструктивно-технологическая схема магистрали с графиком скоростей

На основе вышеуказанных условий в Табл. 1 представлены результаты вычислений продолжительности проезда на перегонах магистрали для двух вариантов с разными значениями максимальных скоростей V_{max} . Здесь для скоростного варианта $V_{max} = 100$ км/ч продолжительность откачки принята 0,3 мин в связи с пониженной степенью вакуумирования до давления 10 % от нормального.

Таблица 1. Продолжительность проезда в ВСТМ для двух вариантов скорости

N	Название станции (ТПУ)	Тип	Расстояние, км		Время проезда при $V_{max} = 500$ км/ч, мин		Время проезда при $V_{max} = 100$ км/ч, мин	
			перегон	итого	перегон	итого	перегон	итого
1	Сестрорецк	I		62,6		19,67		48,06
			14,2		4,13		10,62	
2	Сертолово							
			15,2		4,26		11,22	
3	Девяткино							
			12,5		3,93		9,60	
4	Всеволожск	II		55,0		13,88		39,30
			9,7		3,60		7,92	
5	Новокудрово (Янино)							
			11,0		3,75		8,70	
6	Рыбацкое							
			13,6		4,06		10,26	
7	Пулково	III		29,6		8,41		21,96
			19,2		4,73		13,62	
8	Петергоф							
		III	22,2	29,6	5,09	8,41	15,42	21,96
9	Ижора (Бронка)							
			13,6		4,06		10,26	
10	Кронштадт	III		29,6		8,41		21,96
			16,0		4,35		11,70	
11	Сестрорецк							
	Всего:			147,2		41,96		109,32

Из Табл. 1 следует, что продолжительность проезда существенно зависит от скорости движения поезда в трубе, при этом средняя скорость для высокоскоростного варианта составляет 210,5 км/ч, а для скоростного варианта – 80,8 км/ч. Здесь продолжительность проезда перегонов между станциями для высокоскоростного варианта с максимальной скоростью $V_{max} = 500$ км/ч не превышает 5 мин, что соответствует привычному и удобному для городского пассажира по продолжительности между остановками в метрополитене. Кроме того, здесь предельное значение ускорения (замедления) принято не превышающим 50 % (0,5g) от ускорения свободного падения g , что является допустимым для пассажирского транспорта. Известно, что автомобили многих европейских брендов имеют модификации с временем разгона не более 6,0 с до скорости 100 км/ч. Для примера, автомобиль марки “Opel Insignia OPC” достигает скорости 100 км/ч за 6,0 с при ускорении $4,63 \text{ м/с}^2$ (0,47g), которое принимается для проектирования элементов предлагаемой транспортной магистрали.

Расчетное максимальное количество составов на каждом перегоне на одном пути назначается равным 4 единицам: 3 – в путепроводе (один – на скоростной части и два – в зонах стоянки) и один состав – на платформе в здании ТПУ. Следовательно, общее количество рабочих составов на одном пути ВСТМ составит 40 единиц, не считая резервные, находящиеся на станциях ТПУ с депо (Рис. 1). Пассажирский состав назначается общей длиной 88,0 м из 8 вагонов – модулей с общей вместимостью 64 посадочных места. Таким образом, расчетный объем пассажироперевозок за сутки для четырехпутной магистрали составит 280 тыс. пассажиров, а в год – 102 млн. пассажиров, который вполне сопоставим с данным показателем для линии метрополитена.

ПУТЕПРОВОД И ПАССАЖИРСКИЙ СОСТАВ

Два необыкновенных технических новшества применены в авторском техническом решении высокоскоростной транспортной магистрали для перемещения состава «без трения»: первое – магнитолевитационная транспортная технология Maglev, реализующая электромагнитную подушку и движение при помощи линейного тягового двигателя [5]; второе – технология ЕТТ (Evacuated Tube Transportation), обеспечивающая вакуумирование внутритрубного пространства до заданного уровня [14–19].

В императорской России первенство в данном исследовании принадлежит профессору Борису Павловичу Вейнбергу, который 31 марта 1914 года в Санкт-Петербурге в публичной лекции «Движение без трения», представил результаты своих лабораторных работ в Томском университете. На этой основе были сформулированы основные принципы

организации движения пассажирского вагона внутри стальной или стеклянной вакуумированной трубы посредством внутреннего и внешнего электромагнитного полей [14]. Из отечественных изобретателей, предложивших наибольшее количество оригинальных технических решений на уровне патентов с вышеуказанными новшествами в начале XXI века, первое место, несомненно, принадлежит ветерану – новатору Н.Р. Янсуфину [15]. Однако, наиболее полные и совершенные технические решения, приемлемые для реального технического внедрения, были запатентованы американским изобретателем Daryl G. Oster в 1999 году [16]. В настоящей истории эти предложения составили техническую основу для разработки вакуумной транспортной технологии с линейным электродвигателем в Китае [5] и США [17].

В своей монографии [17] талантливый инженер и бизнесмен Elon Musk дал описание проектируемой транспортной системы Hyperloop для проезда между Лос-Анжелесом и Сан-Франциско (563 км) за 35 мин., использующей технологию ЕТТ (Evacuated Tube Transportation) для высоких скоростей от 480 до 1220 км/ч с ускорением не более 1,0 g. Пассажирская версия высокоскоростной транспортной системы (ускорение не более 0,5 g), в частности, включает: транспортные капсулы вместимостью на 28 мест, снабженные накопителями электроэнергии, охладителями и компрессорами для создания воздушной подушки вместо электромагнитной; путепровод из двух стальных труб с внутренним давлением 100 Па (почти абсолютный вакуум, в 1000 раз ниже нормального атмосферного давления); линейные асинхронные электродвигатели для перемещения капсул внутри труб; железобетонные опоры для поддержки труб на отметках 6–30 м от земной поверхности, установленные через 30 м по длине магистрали; вакуумное оборудование для обеспечения требуемого давления внутри труб; панели солнечных батарей, размещаемые по поверхности труб. В проекте приняты диаметр трубы 2,23 м, поперечный размер пассажирской капсулы 1,35 м и ее высота 1,10 м, что дает поперечную площадь капсулы 1,4 м² и обеспечивает коэффициент заполнения сечения трубы 0,36, определяя 64 % сечения на зазоры. Как пишет автор, такая система в идеале должна представлять собой новый вид транспорта (пятый после самолета, поезда, автомобиля и лодки), который характеризуется как более безопасный, более быстрый, более дешевый, более удобный, независимый от погоды, устойчивый к землетрясениям. Предполагается, что пассажирская версия транспортной системы Hyperloop позволит транспортировать 7,4 миллиона пассажиров в год по каждому пути, затраты на строительство составят 6 миллиардов долларов (менее 9 % от стоимости традиционного высокоскоростного железнодорожного транспорта), стоимость проезда при амортизации за 20 лет составит 20 долларов за поездку в один конец. При этом, добавляет он, в данной разработке пока нет необходимой завершенности в связи с несколькими пока не устраненными фатальными

недостатками, тем не менее это направление является верным решением транспортной проблемы, особенно при высоком трафике городского транспорта [17].

В течение ряда лет в России совместно с исследователями ряда зарубежных стран проводятся исследования по теме высокоскоростного движения и разработке технологии Maglev, которые проводятся учеными ряда научно-исследовательских организаций и высшей школы, прежде всего, в Петербургском государственном университете путей сообщения Императора Александра I под руководством проф. А.А. Зайцева [5]. Большое внимание исследователями уделено разработке отечественной версии транспортной системы Hyperloop [18–20]. Так в большой статье 29-ти авторов “Russia Integrated Transit Transport System (ITTS) Based on Vacuum Magnetic Levitation Transport (VMLT)” [18] предлагается включить тему высокоскоростного атмосферного и вакуумного магнитолевитационного транспорта в «Стратегию развития Российского Федерального Транспорта до 2030».

В настоящей статье авторами предлагается техническое решение, которое характеризуется большей капитальностью, прежде всего повышенной изгибной жесткостью балки путепровода, которая выполнена из 4-х объединенных стальных труб большого диаметра 3020 мм с толщиной стенки 16–30 мм в виде ромба с большей диагональю по вертикали. Между трубами в центре сечения по длине балки расположена продольная коробчатая конструкция с проходом для обслуживания коммуникаций связи, управления и электроснабжения, регулировки предварительного напряжения балки. В каждой трубе устроена рельсовая колея шириной 1520 мм на всём протяжении пути, как на стоянках, в зонах разгона и торможения, так на основных высокоскоростных участках с целью безопасности, например, при отключении электропитания и потере пониженного давления внутри трубы. Пассажирский состав «Роса» из 8 вагонов – модулей общей вместимостью 64 места внешне подобен российскому скоростному «Сапсану», но поперечный размер выполнен более узким почти в 1,5 раза, обеспечен продольный проход с аварийными выходами в первом и последнем вагонах с двухрядной посадкой пассажиров. Цилиндрический модуль изготовлен на основе стальной трубы диаметром 2300 мм с продольным проходом и дверями «крылья чайки», откидываемые вверх при посадке – высадке.

Для данного варианта коэффициент заполнения поперечного сечения трубы составляет 0,59 и на зазоры остается лишь 41 %. Здесь принимается схема не вакуума, а пониженного давления, равного 10 % от нормального атмосферного давления, в связи с ограничением максимальной скорости до $V_{max} = 500$ км/ч. Причем при последующей корректировке конструкций будет выполнен расчет при более высоком давлении внутри трубы путепровода, равном 50–75 % от нормального. Этот подход соответствует недавним исследованиям в разработке отечественной системы Hyperloop, показавшим, что при такой скорости на создание вакуума тратится больше

энергии, нежели на преодоление сил аэросопротивления в разреженном воздухе. Поэтому предложено как более экономичное понижение давления воздуха в трубе в 1,5–2 раза от нормального, а увеличенное сопротивление движению предложено снизить посредством перфорирования обшивки головной части пассажирской капсулы [19].

КОНСТРУКЦИИ ТРАНСПОРТНОЙ МАГИСТРАЛИ

Разработка несущих строительных конструкций, обеспечивающих функционирование, требуемую надежность и безопасность ВСТМ также является основным направлением исследования. Как было сказано ранее, основной уровень рельсового пути для наземного и надводного опорного базиса принят на отметке +88,00 БСВ. Далее для выбора оптимального решения конструктивной основы магистрали, а именно высотных и большепролетных несущих конструкций, поддерживающих балку путепровода, выполнены расчеты с подбором сечений четырех вариантов вантово-стержневых систем (ВСС) эстакадной конструктивной схемы (Рис. 5): *a* – арочно-вантовый, *b* – вантово-стержневой с наклонными вантами и решетчатыми колоннами, *c* – то же, с колоннами из трубобетона; *d* – система с вантами-подвесками по патенту Daryl G. Oster [16].

Для учета жесткости пилонов организованы пространственные расчетные блоки, состоящие из трех больших пролетов L , с нагрузками от составов в центральном пролете. Выполнены расчеты четырех вариантов блоков с определением внутренних усилий в элементах и перемещений узлов с использованием программного пакета SCAD Office 21.1 на сочетании нагрузок и воздействий (статические, динамические, вертикальные и горизонтальные воздействия от собственного веса конструкций, снеговых, ветровых, гололедных нагрузок, пониженного и избыточного давления, нагрузок от подвижного состава, включая продольные нагрузки от его торможения-разгона). Расчетное сочетание нагрузок включало нагрузки от собственного веса конструкции путепровода и временных вертикальных нагрузок от 4-х составов, горизонтальных сил их разгона-торможения, ветрового напора, гололеда и снега. Здесь в расчетах приняты нормативное значение нагрузки от веса четырех поездов 83,4 кН/м и балки путепровода – 10,0 кН/м. В результате найдены абсолютные значения перемещений и усилий при предварительном напряжении несущих и стабилизирующих вант и подвесок, при достижении максимальных амплитуд резонансных колебаний систем от динамической составляющей ветровой нагрузки, включая учет нелинейности [21–23]. Проектирование конструкций транспортной магистрали, включая здания ТПУ, выполнялось по предельным значениям требуемых параметров действующего комплекса нормативно-технической документации (НТД) для конструкций

транспортных и строительных сооружений [24–36], действительных для скоростей движения поездов до 200 км/ч.

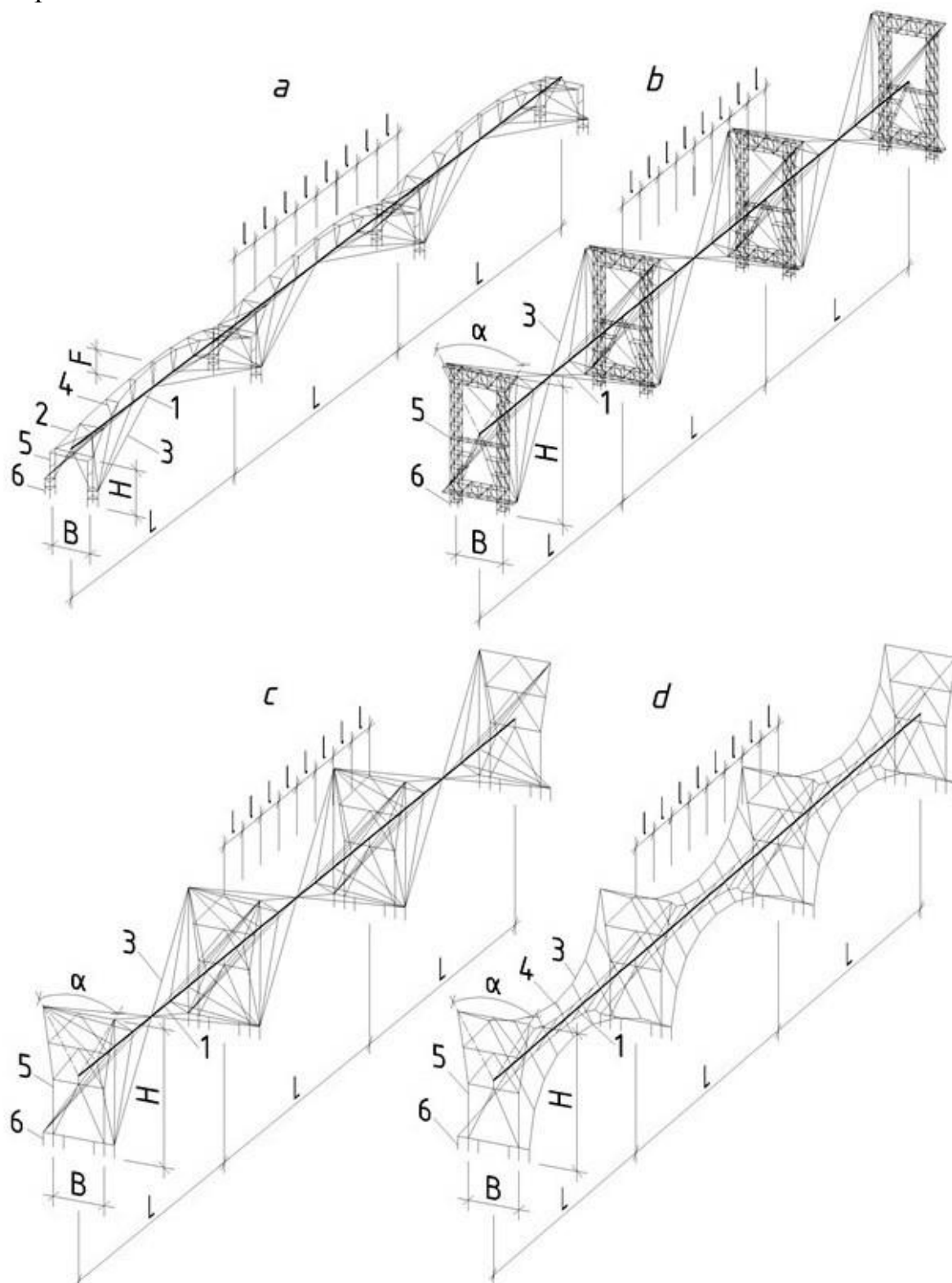


Рис. 5. Пространственные блоки с вариантами конструктивных систем:
а - арочно-вантовая; б – вантово-стержневая с решетчатыми пилонами;
с – то же, с трубобетонными пилонами; d - вантово-стержневая с подвесками

На Рис. 5 обозначены буквами: α – угол между верхними ветвями пилона; B – ширина пилона в нижней части; H – высота пилона до земной поверхности; L – большой пролет несущей конструкции, принятый 360,0 м; l – пролет балки путепровода, принятый 45,0 м. То же, цифрами: 1 – балка путепровода; 2 – арка; 3 – несущие и стабилизирующие ванты; 4 – гибкие подвески; 5 – двухветвевые пилоны; 6 – заглубленные фундаменты.

Таким образом, для железнодорожных мостов при скоростях до 200 км/ч вертикальные упругие прогибы при действии временной вертикальной нагрузки не должны превышать $1/(800-1,25L)$ [26] или 1030 мм на большом пролете несущей конструкции $L = 360,0$ м. Однако в связи с отсутствием специальных технических условий на проектирование сооружений для скоростного и сверхскоростного транспорта предельное значение для прогиба целесообразно назначить равным $1/600$ от главного пролета L , как нормируется в нормах по проектированию мостов [26], что дает предельную деформацию или прогиб $f_u = 600$ мм при $L = 360$ м. Также движение по рельсам производится в режиме нормальной эксплуатации при разгоне-торможении, а также в аварийном режиме, со скоростью не более 200 км/ч, что в исключительном порядке допускает применимость НТД [26] на этих участках до ввода новых норм [20].

Последний деформационный критерий стал определяющим для выбора оптимальных пролетов L и l из следующих серий балок путепроводов 3-трубного и 4-трубного сечений в четырех эстакадных схемах с большими пролетами $L = 1000$ м, 990 м, 810 м, 630 м и 360 м, составленных из балок пролетами $l = 90$ и 45 м. Здесь варьировались геометрические параметры вариантов схемы, такие как стрела арки F , угол между верхними ветвями α и высота колонн H . В результате расчета только наименьшие из данных пролетов оказались приемлемыми по прогибам в середине большого и малого пролетов. Окончательно на основании результатов расчета по усилиям и прогибам определен оптимальный вариант – арочно-вантовая система исполнения с пролетами $L = 360,0$ м, $l = 45,0$ м и пилонами высотой 81,0 м (Табл. 2).

Арочно-вантовый подвариант с меньшей стрелой $F = 36$ м оказался менее металлоемким на 1,5 %, нежели подвариант с большей стрелой $F = 45$ м, требующий материалоемкое обеспечение устойчивости хребтового блока из двух арок из плоскости их плоскости посредством утолщения труб. Аналогично проигрывает выбранному арочно-вантовому варианту самый конкурентный вариант – вантово-стержневая схема с подвесками по причине высокого пилона $H = 161$ м и повышенного расхода канатной стали в связи с колоссальными усилиями в четырех основных вантах, к которым подвешивается балка путепровода.

По результатам проектирования вычислен ориентировочный расход на все стальные элементы большого пролета $L = 360$ м, включая пилон, который составил 7527,6 тонн или 20,9 тонн на 1 м длины магистрали. Например, на постройку северного участка высокоскоростной магистрали длиной 62,6 км предполагается израсходовать 1309 килотонн стали.

Таблица 2. Максимальные усилия и прогибы в середине большого пролета L

NN	Варианты эстакадных схем несущей конструкции пролётом $L = 360$ м	Параметры			Максимальные усилия и прогибы элементов						
		Арка	Пилон		Балка		Подвеска		Ванты		
		Стрела	Угол между верхними ветвями	Высота	Усилие от нагрузок		Перемещение - прогиб узла	Предварительное напряжение	Усилие от нагрузок	Предварительное напряжение	Усилие от нагрузок
		F , м	α	H , м	M , кН·м	N , кН	f , мм	N_0 , кН	S , кН	N_0 , кН	S , кН
1	Арочно-вантовая система (Рис. 5,а)	36,0	-	81	86413	10778	593	350	4601	330	356
2		45,0	-	81	82482	12211	767	300	4479	200	216
3	ВСС с решетчатыми пилонами (Рис. 5,б)	-	60°	161	121024	17614	770	-	-	3400	5312
4		-	30°	161	119694	18553	791	-	-	3200	5961
5	ВСС с пилонами из трубобетона (Рис. 5,с)	-	60°	161	120000	17263	766	-	-	3300	4740
6		-	30°	161	122563	18066	884	-	-	3100	5570
7	ВСС с подвесками (Рис. 5, d)	-	60°	161	66703	2345	388	30000	32552	-	168082

Из приближенного расчета следует, что расчетная стоимость строительства предлагаемой высокоскоростной магистрали (при двухпутной схеме) на сухопутных участках по сравнению со строительством метрополитена будет ниже в 5–6 раз, а на морских

участках – в 3–4 раза в связи с высокими пилонами и глубокими свайными фундаментами.

В статье на первом этапе разработана универсальная расчетная модель, достоверно отображающая арочно-вантовую конструкцию ВСТМ и позволяющая производить последующие итерационные уточнения с целью сокращения ее металлоемкости и стоимости. Так при продолжении работы на втором этапе предполагается отработать варианты конструкций и путепровода, составленные из четырех труб с диаметрами 3020 мм и 3820 мм при внутреннем разряжении до 50–75 % от атмосферного давления, определить оптимальное значение максимальной скорости V_{max} , выполнить проект участка ВСТМ для реальных условий мегаполиса с фундаментами на вибропогружаемых сваях и т.д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На первом этапе разработок предложено предпроектное решение высокоскоростной транспортной системы, устраиваемой на границах связи Санкт-Петербурга и Ленинградской области, при реализации которого для четырехпутной высокоскоростной магистрали расчетный объем пассажироперевозок в сутки может составить 280 тыс. пассажиров, а в год – 102 млн. пассажиров, который вполне сопоставим с данным показателем для линии метрополитена.

2. Высокоскоростная транспортная магистраль, как ожидается, должна обеспечить высокоскоростное окружное перемещение пассажиров как с севера на юг, так и с запада на восток и обратно, минуя основные транспортные пути мегаполиса, преодолевая преграды и проходя над высотной плотной застройкой. Так продолжительность переезда от ТПУ «Сестрорецк» до ТПУ «Рыбацкое», расположенных на схеме диаметрально, составит не более 20 минут.

3. По результатам вариантного проектирования принят арочно-вантовый вариант с пролетом 360 м по критерию металлоемкости, при этом расход стали составил 20,9 тонн на 1 м длины магистрали. Из приближенного расчета следует, что стоимость строительства магистрали на земных участках (двухпутная схема) по сравнению со строительством метрополитена ожидается в 5–6 раз ниже, а на морских участках – в 3–4 раза ниже за счет высоких пилонов и глубоких свайных фундаментов.

4. При продолжении работы на втором этапе предполагается отработать варианты конструкций и путепровода, составленные из четырех труб диаметром 3020 мм и 3820 мм при внутреннем разряжении до 50–75 % от атмосферного давления, следует определить оптимальное значение максимальной скорости V_{max} , выполнить проект участка ВСТМ для реальных условий мегаполиса с фундаментами на вибропогружаемых сваях и т.д.

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. Постановление правительства Санкт-Петербурга от 30 июня 2014 года N 552 “О государственной программе Санкт-Петербурга «Развитие транспортной системы Санкт-Петербурга». Режим доступа: https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/c_transport/gosudarstvennaya-programma-sankt-peterburga-razvitie-transportnoj-sist/. Дата обращения: 20.07.2019. [Postanovlenie pravitel'stva Sankt-Peterburga ot 30 iyunya 2014 goda N 552 “O gosudarstvennoj programme Sankt-Peterburga “Razvitie transportnoj sistemy Sankt-Peterburga”. Available from: https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/c_transport/gosudarstvennaya-programma-sankt-peterburga-razvitie-transportnoj-sist/. (In Russ)].
2. Комитет по развитию транспортной инфраструктуры Санкт-Петербурга. «Концепция развития транспортной системы Санкт-Петербурга». Режим доступа: <https://krti.gov.spb.ru/dorozhnyj-kompleks/koncepciya-razvitiya-transportnoj-sistemy-sankt-peterburga/> Дата обращения: 20.07.2019. [Komitet po razvitiyu transportnoj infrastruktury Sankt-Peterburga. “Koncepciya razvitiya transportnoj sistemy Sankt-Peterburga”. Available from: <https://krti.gov.spb.ru/dorozhnyj-kompleks/koncepciya-razvitiya-transportnoj-sistemy-sankt-peterburga/> (In Russ)].
3. Город без автомобилей // Наука и жизнь. – 2019. – № 7 – С. 48–49. [Gorod bez avtomobilej. *Nauka i zhizn'*. 2019;(7):48-49 (In Russ.)].
4. Лаппо Г.М. Города России. Взгляд географа. – М.: Новый хронограф, 2012. – 504 с. [Lappo GM. *Goroda Rossii. Vzgljad geografa*. Moscow: Novyj khronograf, 2012. 504 p. (In Russ.)].
5. 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.)].
6. Федорова М.В. Скоростной городской транспорт для современной агломерации // Транспортные системы и технологии. – СПб. – 2015. – Вып. 1(1). – С. 26–36. [Fedorova MV. Speed urban transport for modern agglomeration. *Transportation Systems and Technology*. 2015;1(1):26-36. (Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20151126-36
7. 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 uchenykh St-Petersburg: GASU, 2017. Pp. 240-244 (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. Mnogofunkcional'nyj transportno-peresadochnyj uzel, vključayushchij vysoko- i sverhskorostnye magistrali // Aktual'nye problemy stroitel'stva. In “Aktual'nye problemy stroitel'stva” Materialy 70-j Vserossijskoj nauchno-praktičeskoj konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh St-Petersburg: GASU, 2017. Pp. 244-248 (In Russ.)].
9. Яковлев В.В. Предложения по возведению оснований и фундаментов здания ТПУ в районе о.Котлин при реконструкции транспортной системы Санкт-Петербурга / Актуальные проблемы строительства. Материалы 71-й Всероссийской научно-практической конф. студентов, аспирантов и молодых ученых Санкт-Петербургского госуд. архитектурно-строительного ун-та. Ч.3. СПбГАСУ. – СПб, 2018. – С. 141–145. [Yakovlev VV. Predlozheniya po vozvedeniyu osnovanij i fundamentov zdaniya TPU v rajone o.Kotlin pri rekonstrukcii transportnoj sistemy Sankt-Peterburga. In “Aktual'nye problemy stroitel'stva” Materialy 71-j Vserossijskoj nauchno-praktičeskoj konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh St-Petersburg: GASU, 2018. Pp. 141-145 (In Russ.)].
10. 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, vključayushchij vysokoskorostnuyu magistral'. In “Aktual'nye problemy stroitel'stva” Materialy 70-j Vserossijskoj nauchno-praktičeskoj konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh St-Petersburg: GASU, 2017. pp. 207-211 (In Russ.)].
11. 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-praktičeskoj konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh St. Petersburg: GASU, 2019. pp. 185-189 (In Russ.)].
12. Талашкин 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
13. Вакуленко С.П., Евреенова 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. Вейнберг Б.П. Движение без трения. Доступно по: http://veinberg.o7.ru/pdf/no_friction_motion.pdf/. Ссылка активна на 15.09.2019. [Veinberg BP. Dvizhenie bez trenya. Available from: http://veinberg.o7.ru/pdf/no_friction_motion.pdf/. Accessed September 15, 2019 (In Russ.)].
15. Патент РФ на изобретение RU2327586C2 / 27.06.2008. Бюл. №11. Янсуфин Н.Р. Сверхзвуковая транспортная система Янсуфина [Pat. RUS № 2327586C2 / 27.06.2008. Byul. № 11. Yansufin NR. *Supersonic overland transport system Yansufina* (In Russ.)]. Режим доступа: <http://allpatents.ru/patent/2327586.html> Дата обращения: 15.09.2019.
16. Oster Daryl, inventor. *Evacuated tube transport*. United States patent US5950543 (A). 1999 Sept. 14. Available from: <https://patents.google.com/patent/US5950543A/en>
17. Musk E. Hyperloop Alpha, Texas: SpaceX [cited 2019 July 28]. Available at: https://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha-20130812.pdf
18. Terentyev YuA, Filimonov VV, Malinetskiy GG, 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
19. Kim KK. The Russian Version of the Transport System "Hyperloop". *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(2):73-91. doi: 10.17816/transsyst20184273-91
20. Plekhanov PA, Shmatchenko VV. Standardization of Maglev Transportation Systems in Russia. *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(4):32-43. doi: 10.17816/transsyst2018432-43
21. Металлические конструкции: Спецкурс. Учеб. пособие для вузов / Е.И.Беленя, Н.Н. Стрелецкий, Г.С. Ведеников и др.; Под общ. ред. Е.И. Беленя. – М.: Стройиздат, 1982. – 472 с. [Belenya EI, Streleckij NN, Vedenikov GS, et al. *Metallicheskie konstrukcii: Speckurs. Ucheb. posobie dlya vuzov*. Belenya EI, editor. Moscow: Strojizdat, 1982. 472 p. (In Russ.)].
22. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. – Киев: Изд-во «Сталь», 2002. – 600 с. [Perel'muter AV, Slivker VI. *Raschetnye modeli sooruzhenij i vozmozhnost' ih analiza*. Kiev: Stal', 2002. 600 p. (In Russ.)].
23. Корнеев М.М. Стальные мосты. Теоретическое и практическое пособие по проектированию. – Киев: Вид-во ЗАТ «ВИПОЛ», 2003. – 547 с. [Korneev MM. *Stal'nye mosty. Teoreticheskoe i prakticheskoe posobie po proektirovaniyu*. Kiev: VIPOLO, 2003. 547 p. (In Russ.)].
24. СП 16.13330.2017 Стальные конструкции. [SP 16.13330.2017 *Stal'nye konstrukcii*. (In Russ.)].
25. СП 20.13330.2016 Свод правил. Нагрузки и воздействия. [SP 20.13330.2016 *Svod pravil. Nagruzki i vozdeystviy* (In Russ.)].
26. СП 35.13330.2012 Свод правил. Мосты и трубы. [SP 35.13330.2012 *Svod pravil. Mosty i truby*. (In Russ.)].
27. СП 42.13330.2016 Свод правил. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. [SP 42.13330.2016 *Svod pravil. Gradostroitel'stvo. Planirovka i zastrojka gorodskih i sel'skih poselenij*. (In Russ.)].
28. СП 46.13330.2012 Свод правил. Мосты и трубы. [SP 46.13330.2012 *Svod pravil. Mosty i truby*. (In Russ.)].
29. СП 113.13330.2012 Свод правил. Стоянки автомобилей. [SP 113.13330.2012 *Svod pravil. Stoyanki avtomobilej*. (In Russ.)].

30. СП 119.13330.2012 Свод правил. Железные дороги колеи 1520 мм. [SP 119.13330.2012 Svod pravil. Zheleznye dorogi kolei 1520 mm (In Russ.)].
31. СП 120.13330.2012 Метрополитены. [SP 120.13330.2012 Metropoliteny (In Russ.)].
32. СП 259.1325800.2016 Мосты в условиях плотной городской застройки. Правила проектирования. [SP 259.1325800.2016 Mosty v usloviyah plotnoj gorodskoj zastrojki. Pravila proektirovaniya. (In Russ.)].
33. СП 266.1325800.2016 Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования. [SP 266.1325800.2016 Konstrukcii stalezhelezobetonnye. Pravila proektirovaniya. (In Russ.)].
34. СП 268.1325800.2016 Транспортные сооружения в сейсмических районах. [SP 268.1325800.2016 Transportnye sooruzheniya v seismicheskikh rajonah. (In Russ.)].
35. СП 396.1325800.2018 Улицы и дороги населенных пунктов. Правила градостроительного проектирования. [SP 396.1325800.2018 Ulicy i dorogi naselennyh punktov. Pravila gradostroitel'nogo proektirovaniya. (In Russ.)].
36. ГОСТ 27751-2014. Межгосударственный стандарт. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. [GOST 27751-2014. Mezhgosudarstvennyj standart. Nadezhnost' stroitel'nyh konstrukcij i osnovanij. Osnovnye polozheniya. (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

Филимонов Александр Сергеевич, Бакалавр;
E-mail: sanya328kms@yandex.ru

Харитонов Кирилл Евгеньевич, Магистр;
eLibrary SPIN: 6565-0572; ORCID: 0000-0003-0103-6884;
E-mail: kirillharitonov1994@mail.ru

Яковлев Виталий Вадимович, Магистр;
eLibrary SPIN: 2214-8713
E-mail: yakovlev_v_13@mail.ru

Бондарева Елизавета Олеговна, Магистр;
eLibrary SPIN: 4928-7813;
E-mail: elizavetabond95@gmail.com

Меркулова Марина Владимировна; Магистр;
eLibrary SPIN: 3616-7543; ORCID: 0000-0003-2541-1546;
E-mail: kullenish@mail.ru

Медведев Никита Евгеньевич, Магистр;
E-mail: medved280394@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

Aleksandr S. Filimonov, Bachelor of Science;
E-mail: sanya328kms@yandex.ru

Kirill E. Kharitonov, Magister of Science;
eLibrary SPIN: 6565-0572; ORCID: 0000-0003-0103-6884;
E-mail: kirillharitonov1994@mail.ru

Vitaliy V. Yakovlev, Magister of Science;
eLibrary SPIN: 2214-8713;
E-mail: yakovlev_v_13@mail.ru

Elizaveta O. Bondareva, Magister of Science;
eLibrary SPIN: 4928-7813;
E-mail: elizavetabond95@gmail.com

Marina V. Merkulova, Magister of Science;
eLibrary SPIN: 3616-7543; ORCID: 0000-0003-2541-1546;
E-mail: kullenish@mail.ru

Nikita E. Medvedev, Magister of Science;
E-mail: medved280394@mail.ru

Цитировать:

Сенькин Н.А., Филимонов А.С., Харитонов К.Е., и др. К вопросу создания высокоскоростной транспортной магистрали в Санкт-Петербурге // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 73–95. doi: 10.17816/transsyst20195473-95

To cite this article:

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. doi: 10.17816/transsyst20195473-95