

ISSN 2790-4962 (Print)  
ISSN 2790-5373 (Online)

# ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

2022 № 4

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ



НАУЧНО-  
ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ

2022 № 4

УДК 656:625.5

**А.Э. Юницкий<sup>1,2</sup>, С.В. Артюшевский<sup>2</sup>, Д.И. Бочкарев<sup>3</sup>**<sup>1</sup>ООО «Астроинженерные технологии», г. Минск, Беларусь<sup>2</sup>ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь<sup>3</sup>УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель, Беларусь**ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ «ВТОРОГО УРОВНЯ»:  
СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ**

**Аннотация.** В статье приведены результаты анализа основных тенденций влияния транспорта на развитие социально-экономических процессов как в общемировом масштабе, так и непосредственно в Республике Беларусь. Аргументировано показаны преимущества и недостатки традиционных видов транспорта, а также в сравнении с ними транспортных систем «второго уровня» – эстакадных линий, канатных дорог, фуникулеров. Отдельно проанализированы конструктивные особенности струнных транспортных систем Юницкого (Unitsky String Technologies – UST). В частности, представлены сравнительные расчеты основных параметров напряженно-деформированного состояния эстакад разрезной балочной и предварительно-напряженной конструкций. В рамках обоснования общих принципов обеспечения безопасности транспортных систем определены значения коэффициентов запаса по пределу текучести основных элементов рельсо-струнных эстакад UST. Для оценки экономической эффективности транспортных систем UST приведены основные технико-экономические характеристики, капитальные (инвестиционные) и годовые эксплуатационные затраты условного двухпутного транспортного комплекса протяженностью 100 км и производительностью 7,3 млн пасс./год (20000 пасс./сут.).

**Ключевые слова:** транспорт, система, комплекс, эстакада, напряженно-деформированное состояние, безопасность, логистика, технико-экономические показатели, эксплуатация.

**A.E. Unitsky<sup>1,2</sup>, S.V. Artyushevsky<sup>2</sup>, D.I. Bochkaryov<sup>3</sup>**<sup>1</sup>Astroengineering Technologies LLC, Minsk, Belarus<sup>2</sup>String Technologies Inc., Minsk, Belarus<sup>3</sup>Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus**SECOND-LEVEL TRANSPORT SYSTEMS: CURRENT STATE  
AND DEVELOPMENT PROSPECTS**

**Abstract.** The article presents the analysis results of the main trends in the transport influence on the socio-economic processes development, both on a global scale and directly in the Republic of Belarus. The advantages and disadvantages of traditional transport modes argued, as well as in comparison with them the second-level transport systems - overpass lines, cable cars, funiculars. The design features of Unitsky's string transport systems (Unitsky String Technologies – UST) are analyzed separately. Comparative calculations of the stress-strain state main parameters of split beam and prestressed structures of overpasses are presented in particular. The safety factors for the yield strength values of the UST rail-string overpasses main elements were determined as a part of the general principles for ensuring the safety of transport systems justification. The main technical and economic characteristics, capital (investment) and annual operating costs of a conditional double-track transport complex with a length of 100 km and a capacity of 7.3 million passengers per year (20000 passengers per day) are given to assess the economic efficiency of UST transport systems.

**Keywords:** transport, system, complex, overpass, stress-strain state, safety, logistics, technical and economic characteristics, exploitation.

### **Введение**

В условиях нестабильных мировых экономических и политических отношений транспорт является одной из наиболее важных и, одновременно с этим, уязвимых индустриальных технологий. От надежности и стабильности работы транспортно-логистических комплексов зависит деятельность всех отраслей экономики. Пандемии, военные конфликты, экономическая нестабильность, природно-климатические условия и катаклизмы, а также функционирование систем передачи информации оказывают непосредственное влияние на работу традиционных видов транспорта.

С учетом данных факторов становится особенно актуальным принятие рациональных и эффективных проектных решений, позволяющих минимизировать экономические затраты на строительство и эксплуатацию транспортных систем, реализовать их беспроблемную интеграцию в существующую природную биосферу и созданную человечеством на планете техносферу, а также другие области деятельности человека с гарантированным уменьшением рисков влияния внешней среды и внутренних организационных, конструктивных, технологических и законодательных особенностей.

Современное освоение территорий, на которых проживает большая часть мирового населения, характеризуется очень высокой плотностью всех транспортно-инфраструктурных коммуникаций – зданий, сооружений, транспортных и инженерных сетей, большинство из которых находятся либо на поверхности земли, либо в непосредственной близости от нее, преимущественно под землей. В таких условиях не только дальнейшее развитие, но и минимальная реконструкция требуют вмешательства в смежные взаимодействующие сферы. Одновременно с этим, данное глубокое взаимное проникновение современных элементов урбанизации при очевидных преимуществах имеет и недостатки, основными из которых являются невозможность развития одной из систем без вмешательства в другие, а также ограничения, которые данные сферы накладывают друг на друга. Например, развитая сеть городских улиц и дорог уменьшает рекреационные и жилые территории. При этом, еще Леонардо да Винчи в своем проекте идеального города предлагал многоуровневые коммуникации, в частности, устраивая улицы на разных уровнях с целью беспрепятственного движения на перекрестках. В дальнейшем, уже в XX веке идея многоуровневого города появилась у итальянского архитектора-футуриста Антонио Сант-Элиа, в доктрине компактного города с высокой плотностью населения при минимальных процентах застройки французского архитектора Ле Корбюзье и в теории «Город высоких домов» Людвиг Гильберсаймера, а также многократно тиражировалась в кинематографе и литературе.

При этом негативное влияние существующего транспорта на природу и человечество превышает ущерб от техногенных и природных катастроф, локальных войн (без учета мировых войн) и терроризма, вместе взятых. Например, сегодня под автомобильные и железные дороги изъяты у природного землепользователя – биосферы планеты – территории, равные по площади шести Республикам Беларусь, а на прилегающих к дорогам территориям, на порядок большим, почвы деградированы и загрязнены сотнями канцерогенов от выхлопных газов до продуктов износа шин и асфальта, антиобледенительных солей и др. [1]. Сегодня на дорогах мира ежегодно гибнет (с учетом преждевременных смертей от послеаварийных травм, не фиксируемых статистикой) около 1,5 млн человек, а более 10 млн человек получают травмы, становятся инвалидами и калеками. Транспорт сегодня сжигает более 2 млрд тонн топлива в год, выжигая из атмосферы более 10 млрд тонн кислорода, загрязняя почвы, воду и воздух (на высотах до 100 км с учетом авиации и ракетносителей) на всех континентах планеты еще большим количеством экологически опасных и канцерогенных продуктов в результате своей эксплуатации.

В этой связи в настоящее время перед человечеством остро встают вопросы поиска новых транспортно-инфраструктурных решений – более безопасных, более эффективных и экологически чистых. Одним из возможных путей решения данных задач является перемещение взаимодействующих и ограничивающих друг друга инфраструктурно-транспортных элементов в разные плоскости, в частности, перенос путевых структур и подвижного состава транспортных систем на «второй уровень».

### **1. Значение транспорта в современном мировом развитии**

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

Развитие мировой экономики характеризуется ростом ее зависимости от источников сырьевых и энергетических ресурсов вследствие их ограниченности и сильного влияния на мировую динамику цен. Поэтому одной из стратегических задач государства становится контроль за энергосырьевыми ресурсами и путями их транспортирования, осуществление которого обеспечивается, в том числе, в политической и в военной плоскостях. Одновременно с этим, борьба за мировое господство в настоящее время сместилась в область экономического соперничества, а произошедшие в мире перемены показывают, что факторами, определяющими развитие любого государства, являются его экономическая мощь, технологический уровень и стабильность политической системы. При этом защита национальных интересов в экономической сфере является одним из главных направлений политики любого государства, в особенности в условиях снижения экономической активности вследствие пандемии Covid-19.

Транспортный комплекс как непосредственно, так и косвенно оказывает влияние на экономику любого государства, а также граничащих с ним стран, в особенности имеющих выгодное географическое положение с точки зрения транзита, а развитие транспортной инфраструктуры в значительной степени определяет конкурентоспособность товаров. Поэтому наличие как внутренних, так и внешних коммуникаций повышает показатели национальной экономики в сравнении с аналогичными характеристиками территорий, не связанных с международными транзитными коридорами.

Проведенные в разных странах исследования показывают, что кроме влияния на экономические показатели развитие дорожной сети содействует повышению уровня образованности населения, эффективности сельского хозяйства, системы здравоохранения и других социально-значимых направлений. В частности, президент США Дж. Буш утверждал, что система межштатных автомобильных дорог дает импульс развитию отдельным штатам США, объединяя их экономически, политически и социально.

Таким образом, транспортно-инфраструктурная система комплексно влияет на экономическое развитие общества и национальные интеграционные процессы, выступая, с одной стороны, одним из важнейших элементов производства, обеспечивая мобильность ресурсов и товаров, а с другой стороны, облегчает доступность территорий, предоставляя тем самым возможность свободного передвижения населения. В свою очередь, экономическое развитие страны стимулирует развитие спроса на услуги по перевозке пассажиров и грузов.

Исходя из перечисленных тенденций мирового развития, транспортный комплекс можно считать одним из системообразующих факторов мировой экономики, основой хозяйственного и промышленного освоения территорий. Несмотря на экономическую и политическую нестабильность, мировое сообщество интенсивно формирует единую транспортно-инфраструктурную систему, которая базируется на географиче-

ском положении и ресурсном потенциале государств, и включает сеть международных транспортных коридоров, связывающую различные континенты для обеспечения экспортно-импортного товарообмена и международного транзита. Поэтому государства, управляющие международными транспортными коммуникациями глобального характера и имеющие развитую транспортную инфраструктуру, могут играть лидирующую роль и в мировом хозяйственном обороте. На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что транспортная система государства становится вместе с финансовой, политической и социальной одним из базисов, обеспечивающих устойчивость его положения в мировом сообществе, так как традиционные модели экономической политики нуждаются в модернизации в условиях необходимости повышения рентабельности непосредственно реального сектора экономики.

## **2. Значение транспорта в социально-экономическом развитии Республики Беларусь, современное состояние и перспективны развития городского и пригородного транспорта**

Значение транспортной системы в социально-экономическом развитии Республики Беларусь обуславливается рядом факторов, важнейшие из которых определяются географическим положением, экономическими связями и историей нашей страны, а также современными тенденциями развития мировой экономики. К данным факторам можно отнести рост товарооборота между регионами Азии и Европы, релокацию промышленности из европейских стран в азиатские, энергозависимость стран Восточной и Западной Европы от российских энергоресурсов, работу белорусских предприятий в основном на импортном сырье, высокую долю экспорта национального ВВП, а также выгодное территориальное размещение страны на пересечении трансъевропейских автомобильных и железнодорожных магистралей, газо- и нефтепродуктопроводов. При этом, в сфере предприятий транспортных систем республики работает около 5 % от общей численности трудоспособного населения, она включает около 17 % производственных фондов, на развитие которых ежегодно переводится 11 % всех капиталовложений [2], [3]. Транспорт является крупнейшим потребителем топливо-энергетических ресурсов: ежегодно транспортным комплексом используется около 5 % электроэнергии, 75 % бензина и 54 % дизельного топлива от общереспубликанского потребления [2], [3]. Удельный вес транспортного комплекса в ВВП страны составляет более 8 %, что ставит его на уровень важнейших отраслей, обеспечивающих экономический рост и улучшение уровня жизни населения. При этом, удельный вес автомобильного транспорта в общем объеме перевезенных грузов составляет 38,0 %, железнодорожного – 34,0 %, трубопроводного – 27,5 %, внутреннего водного – 0,5 % и воздушного – 0,01 %, а грузооборот соответственно: 22 %, 37 %, 41 %, 0,02 % и 0,04 %. Удельный вес автомобильного транспорта в общей численности перевозимых пассажиров составляет 61,0 %, городского электрического и метрополитена – 35 %, железнодорожного – 4,0 %, воздушного – 0,2 % и внутреннего водного – 0,01 %, а по пассажирообороту соответственно: 41,0 %, 15,0 %, 23,0 %, 21,0 % и около 0,01 % [2], [3].

В Республике Беларусь протяженность автомобильных дорог общего пользования составляет около 87 тыс. км, из них республиканских – около 16 тыс. км и местных – примерно 71 тыс. км. При этом дороги с твердым покрытием составляют около 75,5 тыс. км или 87 %, а грунтовые – 11,5 тыс. км или 13 %. В составе дорожной сети эксплуатируется 5298 мостов и путепроводов общей длиной 187 тыс. пог.м. Производственная и хозяйственная деятельность осуществляется 18 организациями с 203 структурными подразделениями, имеющими общую численность работников 17,5 тыс. чел. [4].

Эксплуатационная длина железнодорожных путей страны составляет 5474 км, из которых около 1270 км электрифицировано. При этом развернутая длина железнодорожных линий равна 11787,4 км, из них главные пути занимают 7193,1 км, станционные – 3472,9 км и подъездные – 1121,4 км. Длина путей с деревянными шпалами составляет

3986,2 км, а с железобетонными – 7799,6 км. Протяженность путей с применением бесстыковой технологии – 4367,7 км. Количество стрелочных переводов в путевом хозяйстве составляет 12561 шт. Общее количество переездов – 1834 шт. Число работников, занятых в деятельности Белорусской железной дороги, составляет около 78 тыс. человек [5].

При этом, международные грузовые и пассажирские перевозки, осуществляемые национальным и иностранным транспортом по территории Беларуси, выполнялись в основном по трем международным транспортным коридорам. № 2: страны Западной Европы – Брест – Минск – Москва; № 9: страны Юго-Восточной Европы – Украина – Республика Беларусь – Финляндия; № 9Б: Гомель – Минск – Вильнюс – Клайпеда/Калининград.

Высокая капиталоемкость традиционных транспортных систем представляет собой существенную проблему, приводящую к росту себестоимости перевозок. Кроме того, эксплуатируемую дорожную сеть необходимо поддерживать в требуемом нормативными правовыми актами техническом состоянии, что требует значительных финансовых затрат. Поэтому в настоящее время протяженность автомобильных республиканских дорог, находящихся в состоянии, не соответствующем нормативным требованиям, насчитывает 5631 км, а длина местных автомобильных дорог, которым требуется ремонт, превышает 35102 км. Из 2273 мостовых конструкций (протяженностью 106,1 тыс. пог.м) на республиканских дорогах страны не соответствуют нормативной документации по габариту и (или) требованиям грузоподъемности 551 сооружение (24,2 %), а на местных автомобильных дорогах из 3025 мостов (80,2 тыс. пог.м) не соответствуют нормативным требованиям 1102 (36,4 %) [4]. В путевом хозяйстве Белорусской железной дороги протяженность путей с просроченными ремонтами ежегодно составляет от 500 до 1000 км или до 15 % от протяженности главных путей.

В то же время, несмотря на общую высокую плотность сети автомобильных и железных дорог, существуют регионы и направления, организация перевозок пассажиров и грузов в которых не соответствует современным требованиям. Так, дорога в Припятском Полесье, которая могла бы поднять на современный уровень перевозки и способствовать экономическому развитию региона, требует значительных капиталовложений, особенно в случае строительства железной дороги вследствие прохождения трассы по участкам со слабонесущими грунтами. Одновременно с этим, во многих районах с плотной застройкой крайне проблематично строительство новых наземных или подземных транспортных коммуникаций, так как их возведение связано с большими объемами работ по переносу объектов и инженерных сетей. Наиболее характерным примером такого процесса является строительство третьей линии Минского метрополитена. Поэтому в качестве одного из возможных способов преодоления проблем, связанных с возведением новых объектов транспортной инфраструктуры, является их перемещение на «второй уровень». Так, многие города мира (Нью-Йорк, Дубай, Токио и т.д.) эксплуатируют линии метрополитена, проходящие на эстакадах непосредственно над городскими улицами и зданиями, а в Китае строится эстакадная железная дорога Хотан – Чарклык через пустыню Такла-Макан в южном районе Синьцзян-Уйгурского автономного района на северо-западе Китая протяженностью 488 км для перевозки 15 млн. т грузов в год.

Другим широко распространенным альтернативным вариантом транспорта «второго уровня» являются канатные дороги. Первая канатная дорога появилась в Швейцарии в 1866 г., она предназначалась для перевозки туристов к смотровой площадке. В настоящее время данный вид транспорта применяется не только в туристических целях, но и для регулярных перевозок. Так, Пражская канатная дорога на сегодняшний день считается самой старой действующей «канаткой» в мире, она была запущена более 120 лет назад. Нижегородская канатная дорога работает с 2012 г. (на 01.01.2021 г. ею перевезено 14806131 чел.) и является единственной канатной дорогой в России и Европе с пролетом над водной по-

верхностью Волги длиной 861,21 м, что является официальным рекордом России. Ее длина составляет 3661 м, пропускная способность – 500 чел./ч при максимальной скорости движения 5 м/с (18 км/ч) [6]. Вследствие возможности с невысокими затратами интегрировать канатные дороги в городскую инфраструктуру, в особенности на местности с перепадом высот, данный вид транспорта получил распространение в Колумбии и Мексике. А самую длинную в мире подвесную канатную дорогу открыли во Вьетнаме недалеко от города Дананг, которая имеет длину 5042 м и состоит из 22 опор и 94 кабин. В то же время, эксплуатация канатных дорог зависит от погодных-климатических факторов – в частности, скорость ветра должна быть не более 15 м/с. Кроме того, практические перевозки посредством канатных дорог имеют невысокую скорость – не более 25 км/ч.

Сочетание преимуществ рельсового транспорта и канатных дорог, выполненное на «втором уровне» и базирующееся на современных разработках в области материалов, транспортных средств и интеллектуальных систем управления, реализовано в струнных транспортных системах Юницкого (Unitsky String Technologies – UST) [1], [7]. В отличие от традиционных видов транспорта, в которых интеграция новых прогрессивных систем вынуждена приспосабливаться к имеющимся конструктивным и техническим особенностям, комплексы UST изначально разрабатываются с учетом актуальных мировых требований, а также путем устранения основных причин транспортной опасности и минимизации рисков.

### 3. Анализ транспортных систем «второго уровня»

Одной из наиболее известных транспортных систем, реализующих принцип транспорта «второго уровня», является подвесная канатная система Герхарда Мюллера [8], в которой транспортное средство движется по путевым канатным системам, подвешенным к несущему или опорному канату, а множество опор поднимают и поддерживают путевые канатные системы и несущую канатную систему между опорами (рисунок 1а).

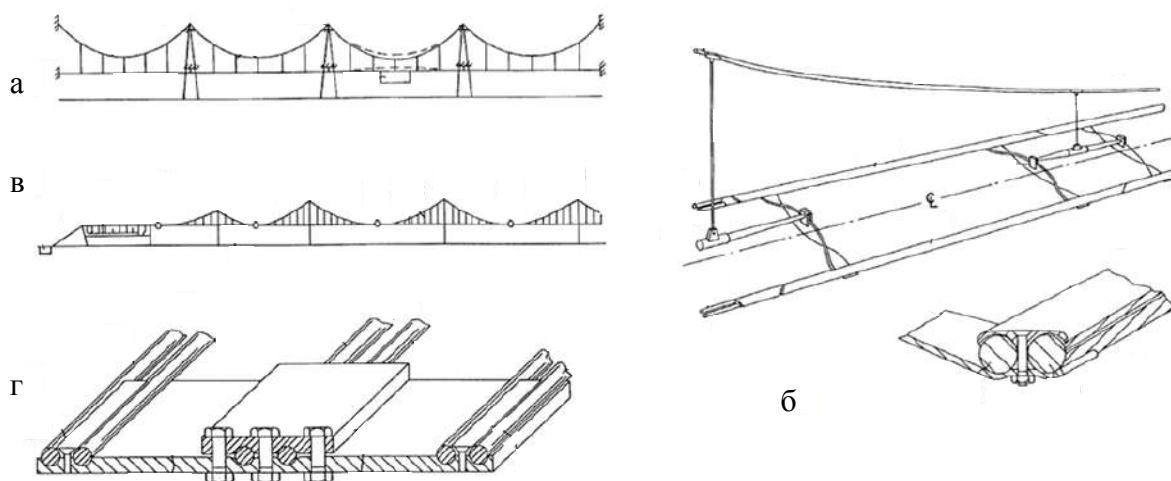


Рисунок 1 – Подвесная канатная система Мюллера [8]

Путевые и несущая канатные системы также закреплены на анкерных опорах для передачи горизонтальных усилий и передачи их на землю (рисунок 1в). Важной конструктивной особенностью системы Мюллера является предварительное натяжение путевых канатных систем, содержащих соединенные между собой канаты и рельсы (рисунок 1б), позволяющее им исключить провисание (располагаться горизонтально) под действием силы тяжести транспортного средства. Кроме того, Мюллер предложил соединить путевые и несущую канатные системы в центрах пролетов посредством пластин (рисунок 1г),

а также выполнить шарнирными соединения путевых и несущей канатных систем (рисунок 1б) и несущей канатной системы с опорами (самоцентрирующиеся пилоны), что позволяет минимизировать продольные смещения пути. В то же время недостатками системы Мюллера считаются повышенный износ несущей канатной системы, опирающейся на ролики в верхних точках самоцентрирующихся пилонов, и возможность перекручивания путевых канатных систем относительно несущей в местах соединения посредством пластин. Кроме того неясно, какую конструкцию ходовой части имеют транспортные средства, движущиеся по путевым канатным системам.

Преодоление отмеченных недостатков реализовано в подвесной системе [9], отличающейся усовершенствованной конструкцией пилона, направленной на снижение износа несущей канатной системы, а также на повышение стабильности положения всей конструкции. Усовершенствованный пилон (рисунок 2а) содержит верхнее и нижнее седло, причем седло, на которое опирается несущая канатная система, шарнирно установлено на опоре для обеспечения маятникового отклонения при действии нагрузок.

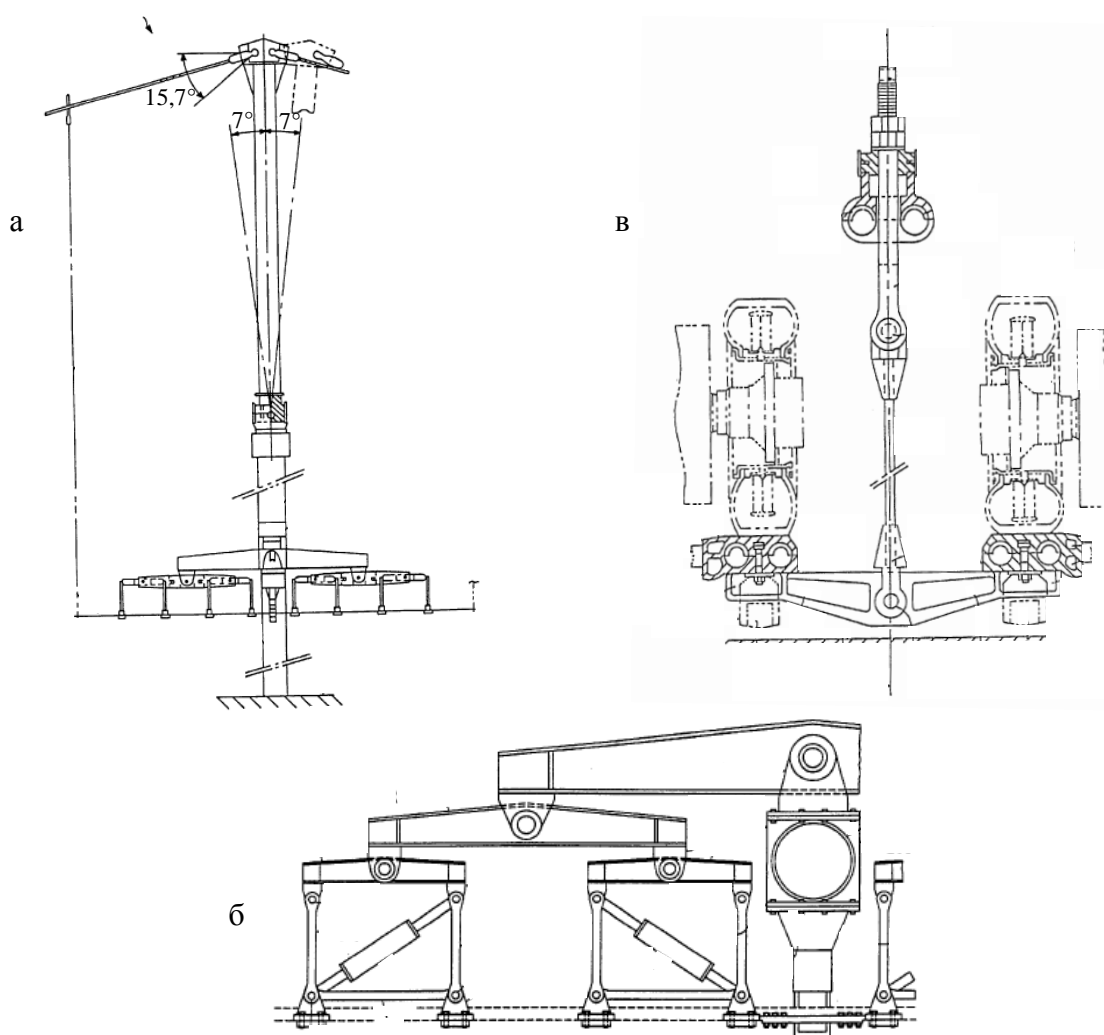


Рисунок 2 – Подвесная система с усовершенствованным пилоном [9]

Нижнее седло включает в себя главную балку, шарнирно установленную на опоре в центре своей продольной оси для вращения в вертикальной плоскости, и пару вспомогательных балок, также шарнирно закрепленных в своих центрах к главной балке. В свою очередь, вспомогательные балки имеют по паре балок, центры которых соединены шарнирно с корпусами вспомогательных балок. Последние из балок имеют



поворотные стержни, к нижним шарнирам которых крепятся путевые канатные системы, при этом между диагональными шарнирами стержней могут быть установлены амортизаторы (рисунок 2б). Особенностью данной системы является наличие несущих (опорных) и боковых (направляющих) колес транспортного средства (рисунок 2в).

К недостаткам данной системы можно отнести большое количество шарнирных элементов, снижающих надежность и повышающих требования к возведению и эксплуатации, а также сложную конфигурацию поперечного сечения рельса и недостаточную надежность его соединения с канатами путевой канатной системы.

Одни из первых попыток практической реализации описанных выше технических решений были осуществлены в 1970 г. недалеко от Шмерикона на озере Верхний Цюрих (протяженность трассы 1,36 км), в комплексе DIETLIKON (Цюрих, Швейцария) в 1974 г. (протяженность 0,6 км) и в комплексе Einspuriges (г. Квебек, Канада) для туристов в 1975 г. (протяженность 0,85 км). Однако данные транспортные комплексы не смогли реализовать требуемых параметров, и их эксплуатация была прекращена.

Второе поколение данных транспортных комплексов было апробировано в Мангейме (Германия), где в период 1975-1976 г. было перевезено 2,5 млн пассажиров восемью транспортными средствами (аэробусами) (рисунок 3).

Третье поколение транспортных комплексов снова вернулось в Цюрих, где в 1980 г. была построена трасса длиной 0,84 км. Однако в 1983 году эксплуатация была прекращена, поскольку местным властям потребовалась занятая территория. В 1984 году швейцарский MASCHINENFABRIK VEVEY

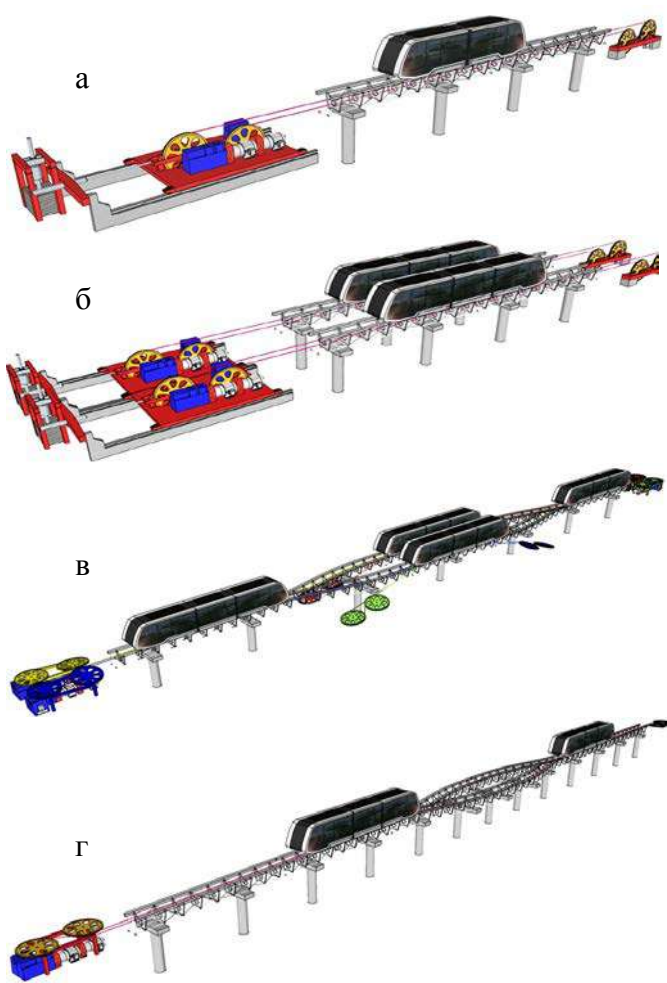
AG производитель железнодорожного подвижного состава, трамваев, оборудования для гидроэлектростанций и механического оборудования заключил соглашение о сотрудничестве с AEROBUS ENGINEERING LTD, владельцем прав на описанную выше конструкцию, для совместной работы в области маркетинга, производства и дальнейшего развития системы, основанной на патенте Мюллера. В результате MASCHINENFABRIK VEVEY AG вступил во владение эксклюзивными правами на патенты подвесной канатной системы AEROBUS и провел испытания опытного образца на машиностроительном заводе Vevey AG в Вильневе.

В настоящее время система AEROBUS рассматривается в качестве альтернативы традиционным видам городского транспорта различными городами, муниципалитетами, строительными и туристическими компаниями вследствие невысоких затрат, визуальной легкости, возможности прохождения в сложных ландшафтных условиях, минимального вмешательства в окружающую среду, а также устойчивости перевозочного процесса. Заявляемые компанией сроки строительства составляют 30 месяцев для участка протяженностью 6 км и 40 месяцев для 30 км участка. Расстояния между опорами системы составляют 200-300 м, удельная масса путевой канатной системы составляет около 70 кг/пог.м,



**Рисунок 3 – Подвижной состав транспортной системы AEROBUS в Мангейме (Германия)**

общая масса несущей и путевой канатных систем при применении профилей коробчатого сечения – 250 кг/ пог.м, возможная скорость движения 60-80 км/ч. На станциях, в кривых и для стрелочных переводов применяется стальная балочная конструкция пути на колоннах с шагом 20-30 м. В качестве подвижного состава предлагается пятивагонный состав вместимостью 125 пасс. с тяговыми секциями на концах, питаемыми от контактной сети. Заявляемая максимальная производительность транспортной системы в зависимости от модификации подвижного состава составляет от 8000 до 20000 пасс./ч (суммарно в обоих направлениях). Ширина габарита, занимаемого транспортной системой, составляет 5 м для однопутной и 10,4 м для двухпутной линий. Система управления комплексом по выполняемым функциям и их реализации аналогична применяемым на железнодорожных линиях и в метрополитене, при этом транспорт управляется водителем, а контроль и управление процессами перевозок – диспетчером. Безопасность комплекса обеспечена соответствием его компонентов требованиям действующих международных нормативных правовых актов, а также проектными и конструкторскими решениями. В частности, в конструкции подвижного состава применены огнезащитные материалы, не выделяющие вредных газов или дыма, боковые направляющие ролики предотвращают сход с рельсов, а в торцевых отсеках находятся аварийные выходы с обеих сторон. Приблизительная стоимость рассмотренной транспортной системы в зависимости от



**а** – однопутный фуникулер; **б** – двухпутный;  
**в, г** – фуникулер с объездным путем  
**Рисунок 4 – Фуникулеры Doppelmaуг Cable Car GmbH**

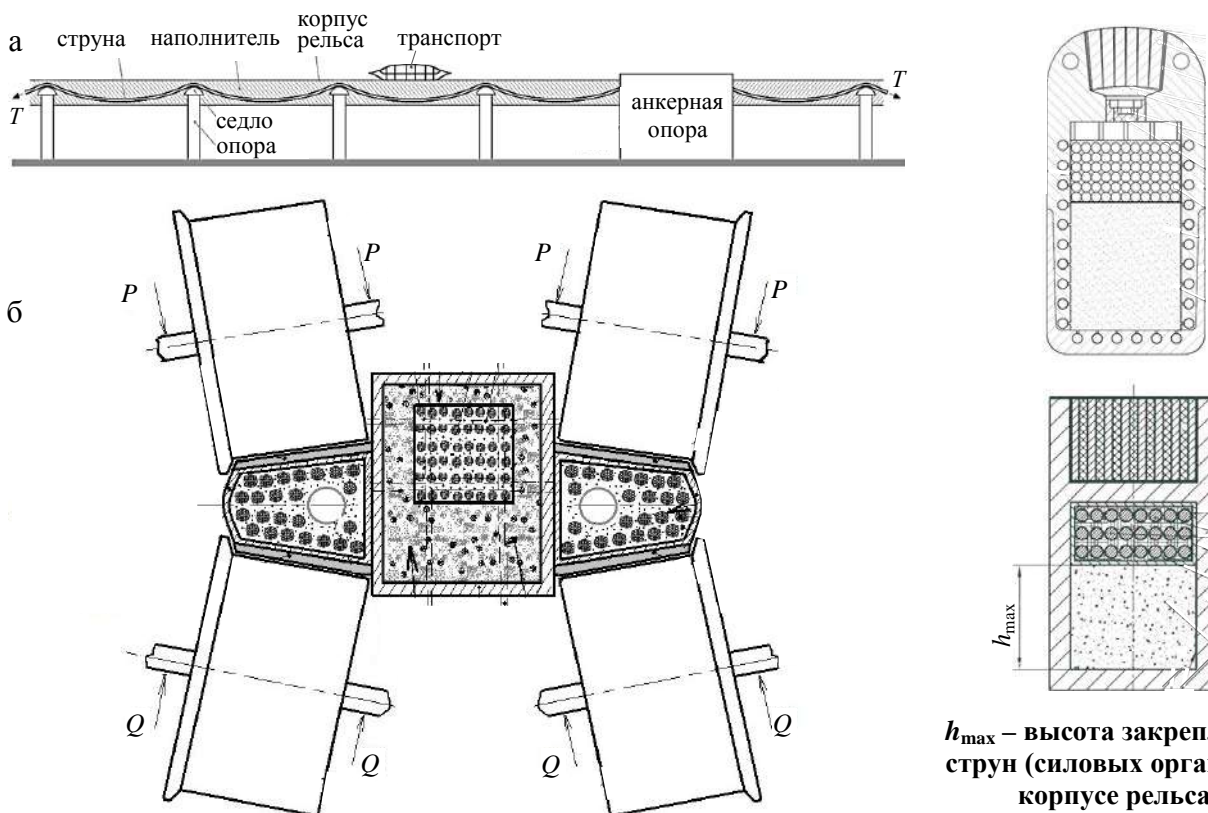
местных условий в ценах 1984 г. составляла от 6 до 9 млн долл. США за километр с учетом стоимости объектов инфраструктуры и транспортных средств. С учетом индексации Bureau of Labor Statistics (используемый индекс USCPI31011913) это составляет 16-25 млн в действующих ценах [10].

К недостаткам рассмотренной системы относится эффект «стиральной доски», не позволяющий развить высокую скорость движения, вследствие невозможности обеспечить постоянную по всей длине трассы продольную ровность и жесткость рельсов, высокая металлоемкость путевой структуры (250 кг/пог.м), что сопоставимо с материалоемкостью рельсо-шпальной решетки трамвайных линий и железных дорог (от 200 кг/пог.м до 720 кг/пог.м), а также зависимость от погодно-климатических факторов.

Современные системы канатных и монорельсовых дорог ведущих мировых производителей (Doppelmaуг/Garaventa Gruppe (Австрия), Pomagaliski S.A. или Roma Group (Франция), Intamin Transportation (Лихтенштейн) и т.д.) и в особенности производимые ими монорельсовые системы и фуникулеры (рисунок 4), в основном лишены отмеченных недостатков. В то

же время, путевая структура монорельсов и фуникулеров имеет высокую материалоемкость, которая может значительно превышать материалоемкость путевой структуры канатных дорог. К недостаткам можно отнести также сложные системы приводов тяговых канатов фуникулеров, ограничивающие автономность подвижного состава.

Развитие рассмотренных конструкций, направленное на стабилизацию продольной ровности рельсов и ширины рельсовой колеи на всем протяжении путевой структуры, с учетом влияния внешних (температурные колебания) и эксплуатационных (масса и динамика движения транспортных средств) факторов посредством увеличения поперечной жесткости путевой структуры, что может способствовать увеличению пролетов между ее смежными промежуточными опорами, росту скоростей движения, а также снижению материалоемкости эффективно, реализовано в системе коммуникаций Юницкого (рисунок 5) [11]. Эта система имеет множество вариантов исполнения [12], [13], отличающихся конструкцией путевой структуры на основе корпуса или фермы постоянной или переменной высоты, а также поверхностей качения рельсов (в виде головки рельса или протяженных полос, закрепленных непосредственно на ней). При этом, общим решением является предварительное натяжение силовых органов, сопряженных с корпусами путевых структур. Дополнительными особенностями данных конструкций являются варианты взаимного расположения рельсов относительно корпусов путевых структур (приближение к нижней плоскости вблизи опор и к верхней посередине пролета и наоборот).



$T$  – сила натяжения;  $Q, P$  – осевая нагрузка (нагрузка от колес транспортного средства на путевую структуру)  
 а – общий вид; б – поперечный разрез корпуса путевой структуры  
 Рисунок 5 – Система коммуникаций Юницкого (вариант)

$h_{\max}$  – высота закрепления струн (силовых органов) в корпусе рельса  
 Рисунок 6 – Варианты исполнения конструкции струнного рельса и наборной поверхности качения головки рельса

Дальнейшее развитие рассмотренных выше вариантов UST направлено на улучшение эксплуатационных параметров – ровности рельсового пути, плавности хода транс-

портных средств, повышения скорости движения, достижение которых возможно посредством модернизации поверхности качения рельса [14], [15], представляющей собой наборный элемент, выполненный в виде установленных на ребра и набранных в блок предварительно напряженных лент или полос (рисунок 6).

Одновременно с этим, исследования в области аэродинамики транспортных средств позволили минимизировать аэродинамическое сопротивление и в разы повысить их энергоэффективность [16].

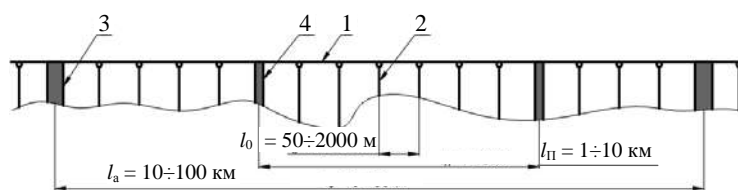
Таким образом, транспортные системы «второго уровня», содержащие рассмотренные технические решения, могут быть эффективной альтернативой традиционным видам городского транспорта, но требуют дальнейшего развития в направлении повышения конкурентоспособности, основным из которых является уменьшение стоимости строительства посредством дальнейшего снижения материалоемкости, что требует инновационных технических решений.

#### 4. Конструктивные особенности струнных транспортных эстакад UST

Наиболее результативным способом достижения максимальной эффективности строительства и эксплуатации путевой структуры (магистральной, по которой происходит непосредственное движение) транспортной системы является применение рациональных конструктивных решений и полное использование физико-механических свойств материалов, из которых она изготовлена.

Из четырех видов напряженно-деформированного состояния (растяжение, сжатие, изгиб, кручение) максимальное использование физико-механических свойств материалов реализуется при растяжении, что легло в основу применения в главном несущем элементе струнных UST – предварительно напряженной струне (канате) и рельсе (в корпусе и/или головке рельса) [1].

Типовая транспортная система UST (рисунок 7) представляет собой конструкцию, содержащую предварительно напряженную рельсо-струнную путевую структуру 1, размещенную на опорах,



$l_0, l_{п}, l_a$  – величина пролета между опорами промежуточными, проездными анкерными и концевыми анкерными соответственно  
Рисунок 7 – Конструктивная схема типовой транспортной системы UST

разделяющихся на три характерных типа: промежуточная 2, концевая анкерная 3 и проездная анкерная 4. Последняя отличается от концевой анкерной опоры 3 тем, что во введенной в эксплуатацию эстакаде она находится в уравновешенном состоянии, но во время строительства и натяжения струнных элементов она является крайней и замыкает на себе усилия от преднатяженных элементов на уже смонтированных участках. Расстояние между опорами зависит от технологии строительства, рельефа местности, используемых материалов для несущих конструктивных элементов, условий эксплуатации, массы и расчетной скорости движения транспортных средств, усилий натяжения и других факторов.

В мировой практике преобладают два типа пролетных строений: жесткая балка и гибкая натянутая нить. Для снижения материалоемкости и достижения максимально высокого значения жесткости путевой структуры под воздействием расчетной подвижной нагрузки нормативная относительная жесткость пролетов мостов и путепроводов принята равной 1/400-1/800 [17]. При этом между упругими предельными вертикальными прогибами  $\delta$ , длиной разрезного (имеющего температурные швы) пролетного строения  $L$  и скоростью движения существует зависимость, приведенная на рисунке 8.

На рисунке 9 изображено балочное пролетное строение традиционного моста. Относительный прогиб такой балки пропорционален приложенной нагрузке, ее длине в соответствующей степени и обратно пропорционален модулю упругости материала  $E$  и моменту инерции поперечного сечения балки  $I$ , который в свою очередь определяется в зависимости от формы поперечного сечения. Поэтому при проектировании стремятся уменьшить пролет, увеличить высоту сечения балки и использовать материал с высоким модулем упругости. При этом, до 90 % нагрузки – это собственный вес (в особенности для железобетонных конструкций), эстакада несет саму себя, а не полезную нагрузку. В частности, наиболее оптимальная по материалоемкости стальная коробчатая балка (рисунок 9в), имеющая относительную жесткость  $1/400$  и пролет  $50$  м, при воздействии сосредоточенной нагрузки  $P = 10$  т ( $98,1$  кН) характеризуется следующими параметрами: площадь поперечного сечения  $960$  см<sup>2</sup> ( $0,096$  м<sup>2</sup>), расход стали  $750$  кг/пог.м, масса  $37,5$  т [1]. Температурные усилия при перепаде температур от  $-50$  °С зимой до  $+50$  °С летом могут достигать в данной балке  $2400$  т ( $23544$  кН), что требует наличия температурных швов в узлах опирания ее концов на ригель опоры. Так как верх опоры не закреплен, то коэффициент  $\mu$ , определяющий приведенную высоту опоры при расчете ее несущей способности, равен  $2$  (рисунок 9б).

Неразрезное предварительно напряженное пролетное строение (рисунок 10) подчиняется правилам гибкой нити. Относительный прогиб его пролета пропорционален нагрузке  $P$  и обратно пропорционален натяжению  $T$ , при этом его величина не зависит от материала нити (струны), ее формы и поперечных размеров. Для обеспечения такой же относительной жесткости, равной  $1/400$  под нагрузкой  $10$  т ( $98,1$  кН), сила натяжения нити должна быть равна  $1000$  т ( $9810$  кН). Поскольку жесткость пролета не зависит от формы поперечного сечения нити, то она может быть изготовлена из высокопрочной проволоки с расчетными напряжениями растяжения порядка  $10000$  кгс/см<sup>2</sup> ( $981$  МПа) (СНиП 2.05.03-84 допускает нормативные сопротивления растяжению в арматурных ка-

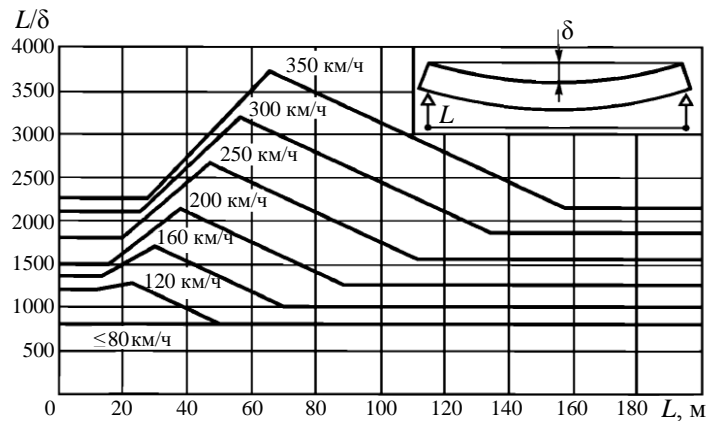
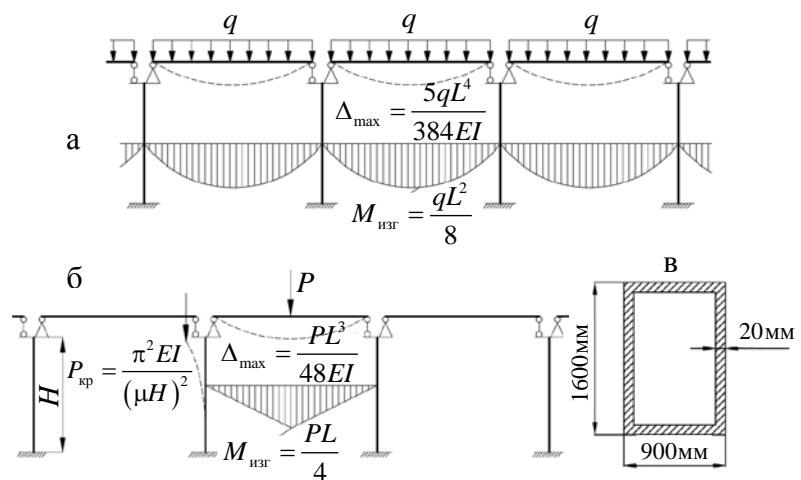


Рисунок 8. – Предельные вертикальные прогибы



$\Delta_{\max}$  – максимальный относительный прогиб пролета;  $M_{\text{изг}}$  – изгибающий момент;  $P_{\text{кр}}$  – критическая сила из условия обеспечения устойчивости опоры;  $I$  – момент инерции поперечного сечения балки;  $H$  – высота опоры; а – эпюры изгибающих моментов от распределенной нагрузки  $q$ ; б – эпюра изгибающих моментов от сосредоточенной силы  $P$  и схема работы опоры балочного пролетного сечения; в – поперечное сечение оптимальной коробчатой балки  
Рисунок 9 – Разрезная эстакада (традиционный мост)

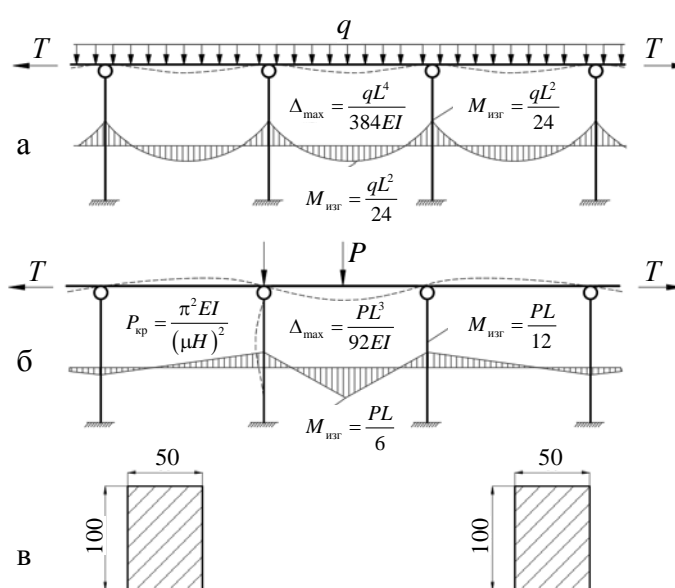
натах марки К-7, равные 13200... 14000 кгс/см<sup>2</sup> (1295... 1373 МПа) [17]). При этом площадь поперечного сечения стальной нити (струны) составит 100 см<sup>2</sup> (0,01 м<sup>2</sup>), а ее масса – 78 кг/пог.м. В результате всего 10 % нагрузки, воспринимаемой такой эстакадой, – это собственный вес, поэтому, в отличие об балки, предварительно напряженная струнная конструкция несет полезную нагрузку, а не саму себя [1].

Струны могут быть размещены в жестком корпусе рельса или внутри поясов фермы, поэтому такая конструкция будет являться жесткой нитью, которая, как и гибкая нить, будет растянута в продольном направлении, а в поперечном направлении – будет иметь изгибную жесткость, как и балка [1]. На рисунке 10 показаны эпюры изгибающих моментов в эстакаде, пролетные строения которой выполнены в виде жесткой нити.

Верх опоры в UST прикреплен к гибкой (или жесткой) нити, т.е. к рельсо-струнной путевой структуре, следовательно, коэффициент  $\mu$ , определяющий приведенную высоту опоры, равен 0,7. Это позволяет сделать вывод: при той же высоте опоры, что и у балочного пролета, для которой  $\mu = 2$ , опора струнного пролета будет иметь в 8 раз большую несущую способность [1]. А поскольку балочный пролет длиной 50 м весит 37,5 т, а струнный пролет – 3,9 т, то расчетная материалоемкость опор и самих пролетов струнного типа будет в 9,6 раз ниже. Пропорционально этому может снизиться стоимость строительства.

Так как концы струнного рельса зафиксированы в узлах анкерения на анкерных опорах, а наиболее опасным явлением для жестко защемленной балки является потеря устойчивости, то необходимо провести проверку на прочность и устойчивость конструкции.

Для стали температурный коэффициент линейного расширения на 1 °С  $a = 0,000012$ . При этом, абсолютная деформация  $\Delta L = a \times L \times \Delta t$  (где  $\Delta t$  – температурный интервал работы конструкции), а относительная деформация для перепада температур от – 50 °С до + 50 °С:  $\varepsilon = \Delta L / L = a \times \Delta t = 0,0012$ , что могло бы составить температурное изменение длины 1 км пути на 1,2 м. Но поскольку концы рельсо-струнного пути защемлены в анкерных опорах, и он не может изменить свою длину, то температурные усилия при этом достигают:  $\Delta \sigma = E \times \varepsilon = E \times a \times \Delta t$ . При  $E = 2 \times 10^6$  кгс/см<sup>2</sup> (196133 МПа) и  $\Delta t = 100$  °С  $\Delta \sigma = 2 \times 10^6 \times 0,0012 = 2400$  кгс/см<sup>2</sup> (235 МПа). При этом, продольное усилие сжатия, возникающее в защемленной балке при перепадае температур,  $N_{сж} = \sigma \times S = E \times a \times \Delta t \times S$ . При  $S = 100$  см<sup>2</sup> и  $\Delta t = 100$  °С,  $\Delta N = 2400 \times 100 = 240000$  кгс (2354 кН). Но если рассматриваемая конструкция будет защемлена (заневолена) при  $t = 0$  °С, то при нагреве до +50 °С усилие сжатия будет в 2 раза ниже – 120000 кгс (1177 кН).



**а – эпюры изгибающих моментов от распределенной нагрузки; б – эпюры изгибающих моментов от сосредоточенной силы и схема работы опоры струнного пролетного строения; в – поперечное сечение бирельсовой струнной путевой структуры**  
**Рисунок 10 – Неразрезная предварительно напряженная рельсо-струнная эстакада**

Таким образом, при усилении предварительного натяжения более 240 т (2354 кН) в рассматриваемой конструкции не возникнут сжимающие усилия, и она не потеряет устойчивости, даже при перепаде температур в 100 °С относительно температуры заземления (–50 °С) [1].

Описанная особенность систем UST исключает необходимость в температурных деформационных швах по длине путевой структуры, однако приведет к сезонному изменению напряжений в ее растянутых элементах. В то же время, это практически не отразится на продольной ровности дорожки качения рельса, т.к. величина температурного прогиба путевой структуры составит относительно небольшую величину –  $(10^{-3} \dots 10^{-5})l_0$ , где  $l_0$  – ее начальная длина.

### 5. Реализация общих принципов обеспечения безопасности UST

Анализ безопасности традиционных видов транспорта – железнодорожного, автомобильного, водного и воздушного показывает, что наиболее опасным является автомобильный: на 160 млн км пробега гибнет 1,6 чел., в дорожно-транспортных происшествиях ежегодно погибает около 1,2 млн чел., а травмы получают до 50 млн [18]. Данная статистика объясняется тем, что автомобильный транспорт является наиболее распространенным в мире. При этом приведенные показатели смертности и травматизма имеют тенденцию к снижению вследствие повышения общего уровня безопасности автотранспортных средств и дорожного движения в целом. Наиболее безопасным является воздушный транспорт: на 160 млн км «пробега» гибнет 0,6 чел. [18]. На втором месте по безопасности находится железнодорожный транспорт – показатель смертности составляет 0,9 человек [18].

В отличие от перечисленных видов транспорта, в которых системы безопасности адаптируются к конструктивным и техническим особенностям, а также к внешней среде, в струнных UST конструктивно и организационно исключен ряд наиболее опасных факторов, таких как встречное столкновение, наезд на пешехода или животное, изменение траектории движения и сход с трассы, гололедица и снежные заносы, падение на землю и невыпущенное шасси, и т.д., которые могут привести к фатальным последствиям. Для минимизации последствий факторов, вероятность возникновения которых возможна, внедрены меры активной и пассивной безопасности [19].

При проектировании рельсо-струнных эстакад соблюдены основные принципы надежности конструкций согласно [19]. Доказано и принято, что меру случайности возникновения рискованного (опасного) события невозможно объективно оценить в высоконадежных системах, поэтому интегральную значимость риска можно задавать как меру количества опасности в любых единицах индикаторных функций. Поэтому для путевых структур основным фактором надежности и безопасности принят коэффициент запаса по пределу текучести материала (таблица 1), что позволило получить расчетную вероятность отказа на уровне  $(1,2 \dots 2)^8 \text{ год}^{-1}$ .

Таблица 1 – Частные коэффициенты запаса основных элементов рельсо-струнных эстакад

| Элементы<br>путевой<br>структуры | Минимальный коэффициент запаса<br>относительно предела текучести используемого материала |          |   |          |
|----------------------------------|--|----------|---|----------|
|                                  | Тип путевой структуры  |          |   |          |
|                                  | полужесткая  |          | гибкая                                  |          |
|                                  | по концентраторам  | по узлам | по концентраторам                       | по узлам |
| рельс (путь)                     | 2  | 9,8      | 2                                       | 9,8      |
| канаты                           | 1,3  |          | 1,3                                     |          |
| седло                            | 2,2  | 3,6      | 2,2                                     | 3,8      |
| подвес седла                     | 7  | 7        | 7                                       | 7        |
| узел анкерения                   | 2  | 3,1      | 2,4                                     | 3,6      |
| полуседло                        | 2,7  | 3,7      | 3                                       | 4,8      |
| вероятность отказа               | $\approx 1,2 \cdot 10^8 \text{ год}^{-1}$  |          | $\approx 2 \cdot 10^8 \text{ год}^{-1}$ |          |

### 6. Основные логистические и технико-экономические показатели UST

Оценку экономической эффективности транспортно-инфраструктурных комплексов UST можно выполнить на основе анализа проектно-сметной документации комплексов, эксплуатация которых возможна как в условиях плотной городской застройки, так и в пригородном сообщении. Типовыми решениями в данных проектах являются однопутная кольцевая и диаметральная трассы. Основные расчетные характеристики на примере реального разработанного объекта для восточного региона приведены в таблице 2. Данный проект предполагал возможность применения кольцевого или маятникового маршрута с полужесткой или гибкой путевой структурой.

Таблица 2 – Основные технико-экономические характеристики струнных транспортных комплексов на примере реального разработанного объекта для восточного региона

| Параметр   | Вид маршрута                   |        |             |        |
|--|--------------------------------|--------|-------------|--------|
|  | кольцевой                      |        | маятниковый |        |
| Тип путевой структуры  | полужесткая                    | гибкая | полужесткая | гибкая |
| Протяженность пути, м  | 5268                           |        | 2187        |        |
| Количество пассажирских станций, шт.   | 10                             |        | 4           |        |
| Количество промежуточных опор, шт.   | 10                             |        | 4           |        |
| Время одного цикла, с  | 836                            |        | 712         |        |
| Максимальная скорость, км/ч  | 85                             |        | 85          |        |
| Стандартное время погрузки-разгрузки, с  | 25                             |        | 25          |        |
| Вместимость юникара  | 16 пассажиров (6 сидячих мест) |        |             |        |
| Интервал при макс. количестве юникаров, с  | 42                             |        | 712         |        |
| Интервал при мин. количестве юникаров, с   | 167                            |        | 712         |        |
| Пассажиропоток при макс. колич. юникаров (оборот 20 % – в среднем 3,2 пасс.), чел./ч | 2280                           |        | 2092        |        |
| Пассажиропоток при мин. колич. юникаров (оборот 20 % – в среднем 3,2 пасс.), чел./ч  | 585                            |        | 674         |        |
| Пассажиропоток при макс. колич. юникаров (оборот 50 % – в среднем 8 пасс.), чел./ч   | 6080                           |        | 3072        |        |
| Пассажиропоток при мин. колич. юникаров (оборот 50 % – в среднем 8 пасс.), чел./ч    | 1560                           |        | 1024        |        |
| Возможность продления маршрута   | да                             | да     | да          | да     |
| Интегрированность в здания района  | да                             | да     | да          | да     |
| Необходимость переноса инженерных сетей  | нет                            | нет    | нет         | нет    |

В качестве транспортных средств возможно использование юникаров – бирельсовых электромобилей подвешенного типа на стальных колесах, предназначенных для грузопассажирских перевозок со скоростями до 150 км/ч, представляющих собой беспилотные транспортные средства, управление которыми осуществляется интеллектуальной системой автоматического управления по маршрутному заданию под контролем диспетчера.

Ориентировочная стоимость рассматриваемых выше транспортных комплексов UST по элементам затрат приведена в таблице 3.

Точная стоимость каждого отдельного проекта строительства может быть определена только после детального исследования условий прохождения будущей трассы: грунтов и рельефа местности, высоты размещения путевой структуры и длин пролетов, наличия городской застройки, зданий, сооружений, инженерных сетей, коммуникаций и т.д. При этом стоимость 1 км струнной UST сопоставима со стоимостью 1 км одной полосы движения автомобильной дороги I технической категории [20]. Причем стои-



мость строительства всей автодороги будет выше в 4-8 раз (пропорционально количеству полос), а землю, покрытую асфальтобетоном, невозможно будет использовать по другому назначению.

Таблица 3 – Капитальные (инвестиционные) затраты на строительство струнных транспортных комплексов на примере реального разработанного объекта для восточного региона

| Параметр   | Вид маршрута |          |             |          |
|--|--------------|----------|-------------|----------|
|  | кольцевой    |          | маятниковый |          |
| Тип путевой структуры  | полужесткая  | гибкая   | полужесткая | гибкая   |
| Совокупные капитальные затраты на проект при мин. количестве юникаров, долл. США                             | 51361465     | 48385643 | 22515091    | 21494892 |
| Совокупные капитальные затраты на проект при макс. количестве юникаров, долл. США                            | 61157717     | 58181895 | 23821258    | 22801059 |
| Совокупные эксплуатационные расходы при мин. количестве юникаров (в год), долл. США                          | 959601       | 959601   | 245543      | 2245543  |
| Совокупные эксплуатационные расходы при макс. количестве юникаров (в год), долл. США                         | 1849910      | 1849910  | 360386      | 360386   |
| Максимально возможный теоретический доход (прибыль) в год (при 100 % загруженности и 20 юникарах), долл. США | 82424063     | 82424063 | 41501275    | 41501275 |
| Срок окупаемости при мин. количестве юникаров, лет   | 11           | 8        | 5,3         | 5,1      |
| Срок окупаемости при макс. количестве юникаров, лет  | 3,9          | 3,7      | 3           | 2,9      |

### Заключение

Таким образом, создание транспортной системы «второго уровня», интегрируемой в сферу жизнедеятельности человека, в частности, в городскую среду, представляется реальной задачей с использованием современных достижений в областях расчетных моделей, материаловедения, методов и средств обеспечения безопасности, информационных технологий. Реализация данной концепции осуществлена в струнных транспортных комплексах UST, которые проходят апробацию в ЭкоТехноПарке ЗАО «Струнные технологии» (Республика Беларусь, г. Марьина Горка) и в uSky Test & Certification Center in the Emirate Sharjah (Объединенные Арабские Эмираты, г. Шарджа).

При достижении расчетных характеристик транспортного комплекса протяженностью около 5 км и максимальной пропускной способностью до 6080 чел./ч возможно создание эффективной альтернативы традиционным видам наземного транспорта. Приведенные основные технико-экономические и логистические характеристики, капитальные (инвестиционные) и годовые эксплуатационные затраты показывают возможность осуществления данного транспортного комплекса «второго уровня» в условиях современного мегаполиса.

### Список использованных источников

1. Юницкий, А.Э. Оптимизация наземной транспортной системы / А.Э. Юницкий // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2005. – № 4. – С. 45-50.
2. Транспорт в Республике Беларусь [Электронный ресурс] / Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – Минск, 2020. – Режим доступа:

<https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/e58/e58620b44fc739884f156af60bf23ae1.pdf>. – Дата доступа: 01.06.2022.

3. Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь [Электронный ресурс] / Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 23 марта 2021 г. № 165 «О Государственной программе «Транспортный комплекс» на 2021-2025 годы». – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100165&ysclid=16g703nбgy261667167>. – Дата доступа: 01.06.2022.

4. Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь [Электронный ресурс] / Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 9 апреля 2021 г. № 212 «О Государственной программе «Дороги Беларуси» на 2021-2025 годы». – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100212&ysclid=16g78kmkeu230954530>. – Дата доступа: 01.06.2022.

5. Статистический ежегодник Национального Статистического Комитета (БелСтат) за 2021 [Электронный ресурс] / Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – Минск, 2021. – Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/d8c/yr1d8w95a75bnumml7vbg6jquyih369.pdf>. – Дата доступа: 01.06.2022.

6. Нижегородские канатные дороги / Технические характеристики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nnkd.ru/tehnicheskie-harakteristiki>. – Дата доступа: 01.06.2022.

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

8. Cableway system and particularly support system therefor: Pat. US4069765; B61B12/02; E01B25/18 / Gerhard Miller. – Application No. 637675; filed: Dec. 4, 1975 // Published: United States Patent. – Jan. 24, 1978.

9. Elevated cableway system: Pat. US6324990 B1; B61B12/00 / Andre O. Pugin, Hans Wettstein, Per Aasheim. – Application No. 09/539538; filed: Mar. 31, 2000 // Published: United States Patent. – Dec. 4, 2001.

10. Inflation Calculator [Электронный ресурс] / calculator.net. – 2008-2022. – Режим доступа: <https://fxtop.com/ru/inflation-calculator.php>. – Дата доступа: 01.06.2022.

11. Система коммуникаций Юницкого: пат. 031884 ЕА, МПК В61В3/02; В61В5/02; В61В13/04; В61В15/00 / А.Э. Юницкий. – № 201600630; заявл. 20.06.2016; опубл. 29.03.2019 // Евразийское патентное ведомство.

12. Система коммуникаций Юницкого (варианты): пат. 031956 ЕА, МПК В61В3/02 / А.Э. Юницкий. – № 201600631; заявл. 20.06.2016; опубл. 29.03.2019 // Евразийское патентное ведомство.

13. Система коммуникаций Юницкого (варианты): патент ЕА 032041, МПК В61В 3/02 / А.Э. Юницкий. – № 201600632; заявл. 20.06.2016; опубл. 29.03.2019 // Евразийское патентное ведомство.

14. Рельс транспортной системы: пат. 031807 ЕА, МПК Е01В 5/08 / А.Э. Юницкий. – № 201700334; заявл. 09.06.2017; опубл. 28.02.2019 // Евразийское патентное ведомство.

15. Транспортная система Юницкого: пат. 031917 ЕА, МПК В61В 3/02 / А.Э. Юницкий. – № 201700049; заявл. 23.12.2016; опубл. 29.03.2019 // Евразийское патентное ведомство.

16. Высокоскоростной транспортный модуль (варианты): пат. 031675 ЕА, МПК В62D 35/00 / А.Э. Юницкий. – № 201700220; заявл. 23.03.2017; опубл. 28.02.2019 // Евразийское патентное ведомство.

17. Строительные нормы Республики Беларусь. Мосты и трубы: СН 3.03.01-2019. – Введ. 09.07.20. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2020. – 268 с.

18. Панов, Н.Н. Сравнительный анализ безопасного вида транспорта в России / Н.Н. Панов, А.В. Тюменев // Системные технологии. – 2017. – № 24. – С. 34-39.

19. Юницкий, А.Э. Безопасность путевых структур второго уровня на примере рельсо-струнных транспортных систем Юницкого / А.Э. Юницкий, С.В. Артюшевский // Проблемы безопасности на транспорте: материалы X Междунар. науч.-практ. конф.: в 5 ч., 26-27 нояб. 2020 г. / Белорус. гос. ун-т транспорта. – Гомель, 2020. – Ч. 4 – С. 69-72.

20. Решетова, Е.М. Сравнение стоимости строительства автомобильных дорог в России и странах мира / Е.М. Решетова / Экономика и управление. – 2015. – № 4. – С. 118-124.

---

#### Информация об авторах

#### Information about the authors

*Анатолий Эдуардович Юницкий* – генеральный конструктор ЗАО «Струнные технологии» и ООО «Астроинженерные технологии» (пр. Дзержинского, 104, 220116, г. Минск, Беларусь), e-mail: a@unitsky.com.

*Anatoli E. Unitsky* – Chairman of the Board of Directors and General Designer, String Technologies Inc., Astroengineering Technologies LLC (104, Dzerzhinsky Ave., 220116, Minsk, Belarus), e-mail: a@unitsky.com.

*Сергей Владимирович Артюшевский* – магистр технических наук, заместитель генерального конструктора по науке, ЗАО «Струнные технологии» (пр. Дзержинского, 104, 220116, г. Минск, Беларусь), e-mail: s.artushevskiy@unitsky.com.

*Sergey V. Artyushevsky* – Master of Engineering Sciences, Deputy General Designer for Science, String Technologies Inc. (104, Dzerzhinsky Ave., 220116, Minsk, Belarus), e-mail: s.artushevskiy@unitsky.com.

*Дмитрий Игоревич Бочкарев* – кандидат технических наук, доцент, декан строительного факультета, УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: bochk\_dmitr@mail.ru.

*Dmitriy I. Bochkaryov* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Dean of the Construction Faculty, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gornel, Belarus), e-mail: bochk\_dmitr@mail.ru.

Поступила в редакцию 13.06.2022 г.