

## НОВЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО МЕТРОПОЛИТЕНА г. БИШКЕК

### NEW DESIGN SOLUTIONS OF PROSPECTIVE UNDERGROUND OF CITY BISHKEK

*Шаардык метрополитенди куруу үчүн жасалма курулуштардын жаңы конструкциялары сунуш кылынат.*

*Ачык сөздөр: Метрополитен, мегаполис, станция, аэростатичный тоннель, инфраструктура.*

*Предлагаются конструктивные решения искусственных сооружений для строительства городского метрополитена.*

*Ключевые слова: Метрополитен, мегаполис, станция, аэростатичный тоннель, инфраструктура.*

*The article suggests solutions for the construction of artificial structures the city's underground.*

*Keywords: metro, megalopolis, station, aerostatic tunnel, infrastructure.*

**Актуальность темы исследования.** В условиях интенсификации транспортных потоков в г. Бишкек вопрос очевидности поиска путей решения данной проблемы является актуальной. Опыт крупных мегаполисов показывает, что перелокция пассажирских потоков в подземные тоннельные системы решает эту проблему. Однако, организация подземных метрополитенов возможна только при условии однородности и структурной устойчивости грунтов основания городских массивов. В противном случае, это вызовет дополнительные расходы по оптимизации несущих конструкций тоннелей, что вызовет как технические, так и экономические риски. Проблема строительства метрополитена в геологических условиях г. Бишкек дополняется также сейсмической активностью района, этот фактор, по сути, является преобладающей. Эксплуатация подземных сооружений в условиях повышенной сейсмической эмиссии наиболее опасна, т.к. разрушения от действий сейсмических сил будет носить катастрофический характер. Следует отметить, что подземная тоннельная проходка сама по себе очень дорогостоящая и не возможна при отсутствии высокотехнологичных горных проходческих щитов, а в Кыргызской Республике на данном этапе нет подобного технологического оборудования. Открытые способы тоннельной проходки для Бишкека неприемлемы, т.к. существующая застройка и интенсивность транспортных потоков не позволяют производить такие работы.

**Вантовый аэростатичный тоннель.** Решением актуальной транспортной задачи может служить предлагаемое техническое решение большепролетного вантового мостового сооружения. Задачей конструктивного решения является создание большепролетного вантового аэростатичного тоннеля, обеспечивающего движение железнодорожных составов в замкнутом аэростатическом пространстве, характеризующемся отсутствием ветровых нагрузок на подвижные составы, что позволит развитию подвижными составами скоростей без значительных расходов на тягу, а также защитит окружающую застройку от шумовых воздействий.

Техническая сущность предлагаемого решения заключается в обеспечении высокоскоростного железнодорожного движения по вантовому тоннелю достигаемого отсутствием в его полости ветровых нагрузок, исключая атмосферную турбулентность для железнодорожных составов, и применением для изготовления тоннельной обделки легких композитных материалов или легкосплавных металлических листов, что с предлагаемой вантовой системой повышает сейсмическую устойчивость всего сооружения.

На рис. 1. представлен общий вид одного из пролетов вантового тоннеля; на рис. 2. представлена трехмерная визуализация технического решения. Вантовый тоннель содержит балку жесткости, которая несет тоннельную обделку и установлена на горизонтальных перемычках А-образных пилонов, возведенных с концов тоннельного пролета, в пределах которого по обеим сторонам балки жесткости металлические арки, по вершинам сопряженные друг с другом и концами жестко прикрепленные к соответствующим ребрам пилон. Каждая арка соединена параллельными по фасаду тросовыми подвесками с балкой жесткости и диагональными металлическими вантами с соответствующим ребром А-образного пилон. В полости тоннельной обделки расположен железнодорожный путь.

Вантовый тоннель работает следующим образом. Железнодорожный состав движется внутри тоннеля в отсутствии ветровых нагрузок в аэростатическом режиме, что позволяет достичь высокой скорости при значительном снижении потребления энергии на привод. Турбулентность, создаваемая движением собственно, подвижными составами не вступает во взаимодействие с ветровыми явлениями атмосферы и гасится внутри обделки тоннеля.

Эффективность вантовой системы по противодействию сейсмическим силам очевидна, т.к. жизнеспособность вантовых и висячих систем доказана землетрясениями в районах, где подобные системы получили развитие. Проведенный численный эксперимент показал, что сооружение имеет высокую сейсмостойкость, что видно из спектрографического анализа результатов, где «красные и темные» зоны напряжений вне основных пролетов вантового тоннеля. Предельные напряжения развиваются преимущественно в зонах «береговых» опор вантового тоннеля, что не представляет опасности для динамической устойчивости сооружения. Изополя перемещений и напряжений приведены на рис. 3.

Предложенное решение можно внедрить при строительстве перегонов, где не представляется реализация эстакадных мостов с частыми пролетами в местах интенсивной застройки. Но, ввиду дороговизны металлических вантовых систем, там, где возможно строить обычные эстакады, лучше использовать эстакады, а в местах, возможных для наземного трассирования – проходить по земле.

Численные экспериментальные исследования, проведенные в среде программного продукта Lira подтверждают устойчивость сооружения от сейсмических, ветровых и подвижных нагрузок и позволяет перекрывать пролеты до 500 м.

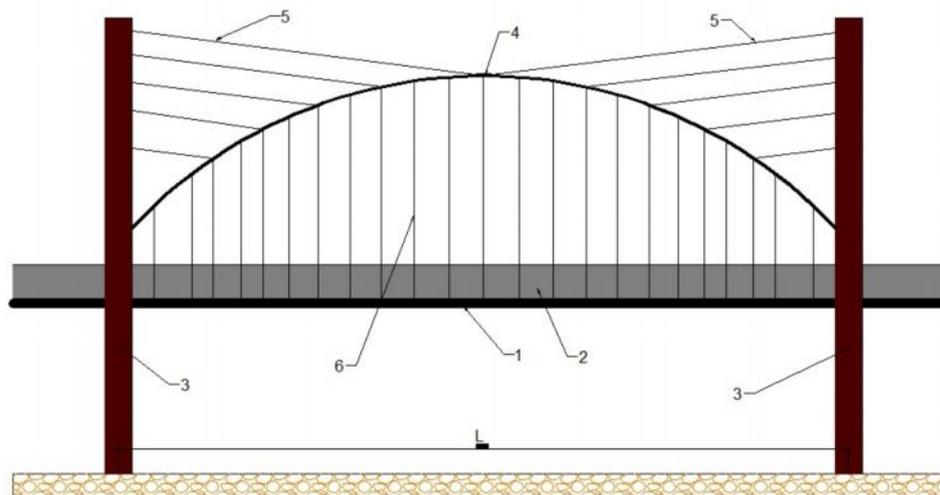


Рис. 1. Общий вид одного пролета вантового тоннеля  
 1 – балка жесткости, 2 – тоннельная обделка, 3 – А-образные пилоны, 4 – металлические арки, 5 – диагональные металлические ванты, 6 – вертикальные металлические подвески



Рис. 2. Трехмерная визуализация вантового тоннеля

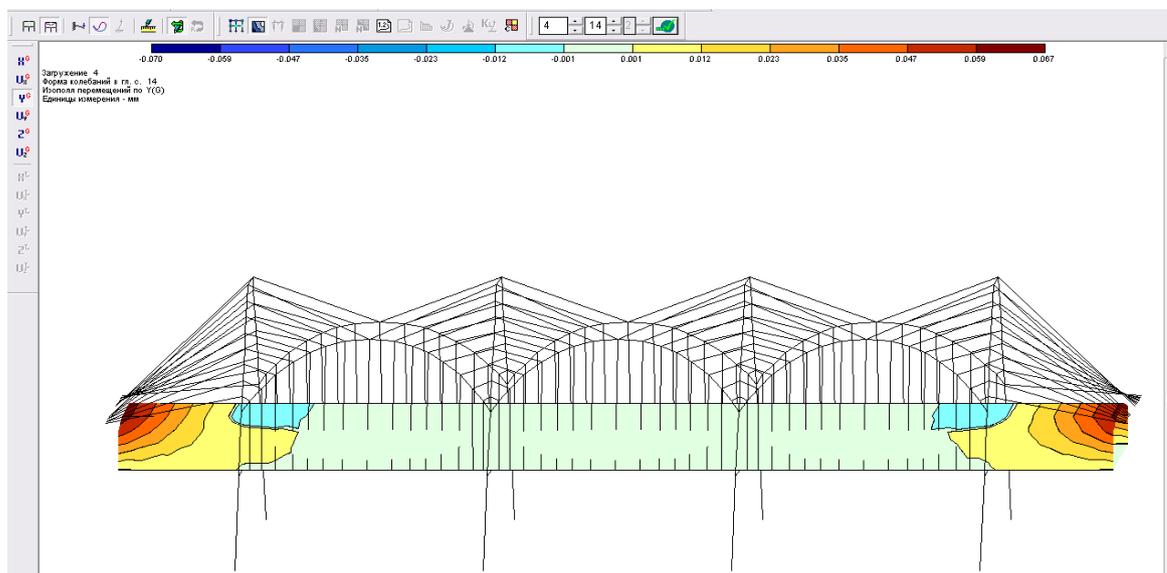


Рис. 3. Изополя напряжений от сейсмических сил

**Перспективное планирование городского метрополитена г. Бишкек.** В связи с ростом населения г. Бишкек и транспортно-пассажирских потоков есть необходимость строительства городского метрополитена. В период с 1991 по 2015 годы численность населения города возросла с 625 тысяч до одного миллиона, а с учетом агломерации более одного миллиона и существует устойчивый тренд по дальнейшему росту населения ввиду миграционного давления.

Горные породы под городом позволяют строить подземный метрополитен мелкого заложения, но в целях экономии средств и с учетом факторов сейсмичности района целесообразнее создавать линии с надземными и наземными станциями и перегонами.

Две линии легкого метро по образцу Дубайского метрополитена рекомендуется проложить на эстакадах (в центре) и по земле (на окраинах) с использованием малогабаритного подвижного состава из 6-8 вагонов и двух несущих автомотрисов.

Инфраструктура и подвижной состав легкого метро Бишкека могут быть основаны на базе украинской системы РАДАН разработки КБ им. Антонова. Хотя с точки зрения эффективности и экономической целесообразности лучше использовать подвижной состав западных или китайских производителей и использовать в метро международную ширину колеи 1435 мм.

Первая (красная) линия с 7 промежуточные станциями сможет связать южные районы с северными, рекомендуемые станции: «Асанбай», «Южная», «Медицинская», «Турецкая» (Юг 2), «Центральная», «Карагачевая роща», «Дордой».

Вторую (фиолетовую) линию с 10-11 промежуточными станциями рекомендуется проложить с востока на запад также через центр, где будет станция пересадки. Возможные станции: «Покровка», «Аламедин», «Восток 5», «Центральная» (пересадочная), «Спортивная», «Университетская», «Ошский базар», «Западная», «Кудайберген», «Новопавловка», «Автомобильная». Такая конфигурация позволяет обеспечить транспортом пригороды города и снизит давление на автомобильные дороги. Также вероятнее всего, город будет развиваться в восточном и западном направлении, а также до границы с Казахстаном. По этой причине крестовидная схема метро с промежуточной радиальной (синей) линией представляется наиболее эффективной, т.к. позволит в будущем наращивать другие линии.

Существует целесообразность сооружения линии городского аэроэкспресса (голубая линия), которая должна соединить центр города с международным аэропортом «Манас».

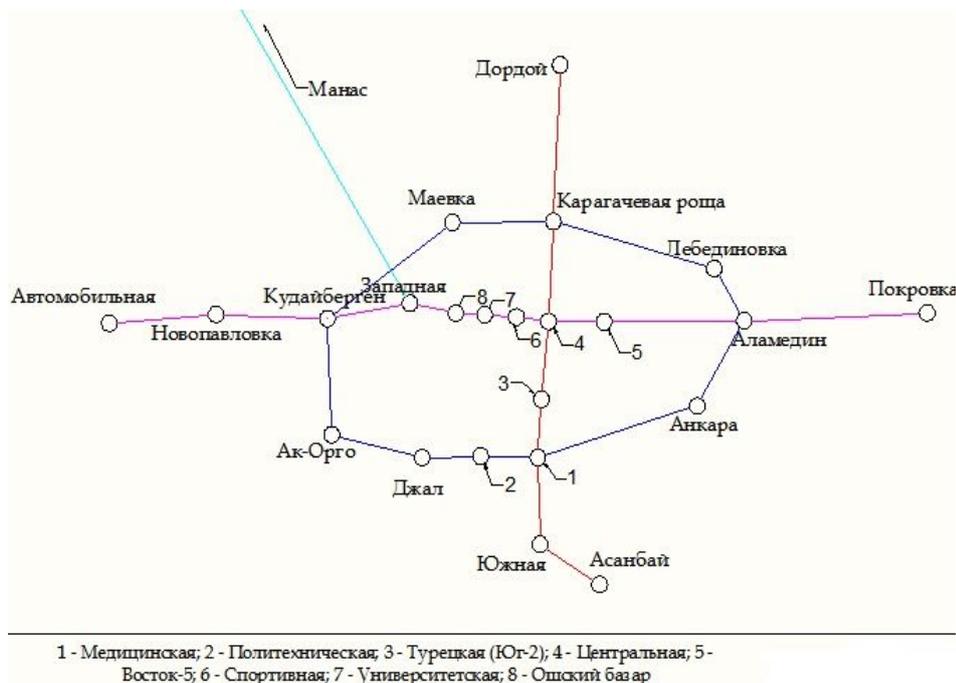


Рис. 4. План перспективного метрополитена г. Бишкек

В целом система линий легкого метро и городского электропоезда свяжет крупнейшие жилые микрорайоны, важные транспортные узлы и наиболее посещаемые общественные объекты. Система должна обеспечить 60-70 % городских пассажирских перевозок. Ее создание запланировано к 2025 г. и внесено в новый генеральный план города Бишкек (согласно Wikipedia).

Предварительные финансовые оценки строительства Бишкекского метрополитена находятся в пределах 0,44 млрд USD. К строительству очевидно будут привлечены иностранные (вероятнее всего – китайские) инвесторы. Но в СМИ и официальных источниках пока отсутствуют данные о ТЭО.

**Конструктивные и объемно-планировочные решения железнодорожной станции на центральных и южных перегонах.** Для центральных и южных районов в работе предложена станция «Южная», принятые конструктивные решения приведены на следующих ниже рисунках.

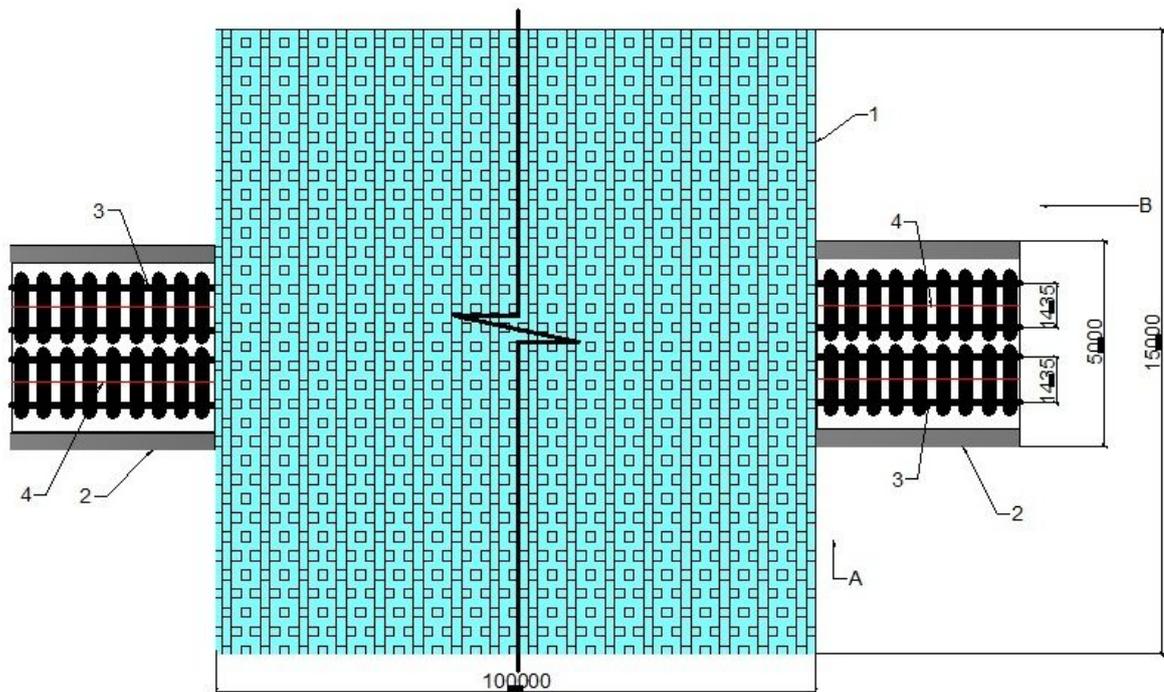


Рис. 5. Станции «Южная», вид сверху:

1 – здание станции, 2 – эстакада, 3 – бесбалластный путь, 4 – контактная сеть.

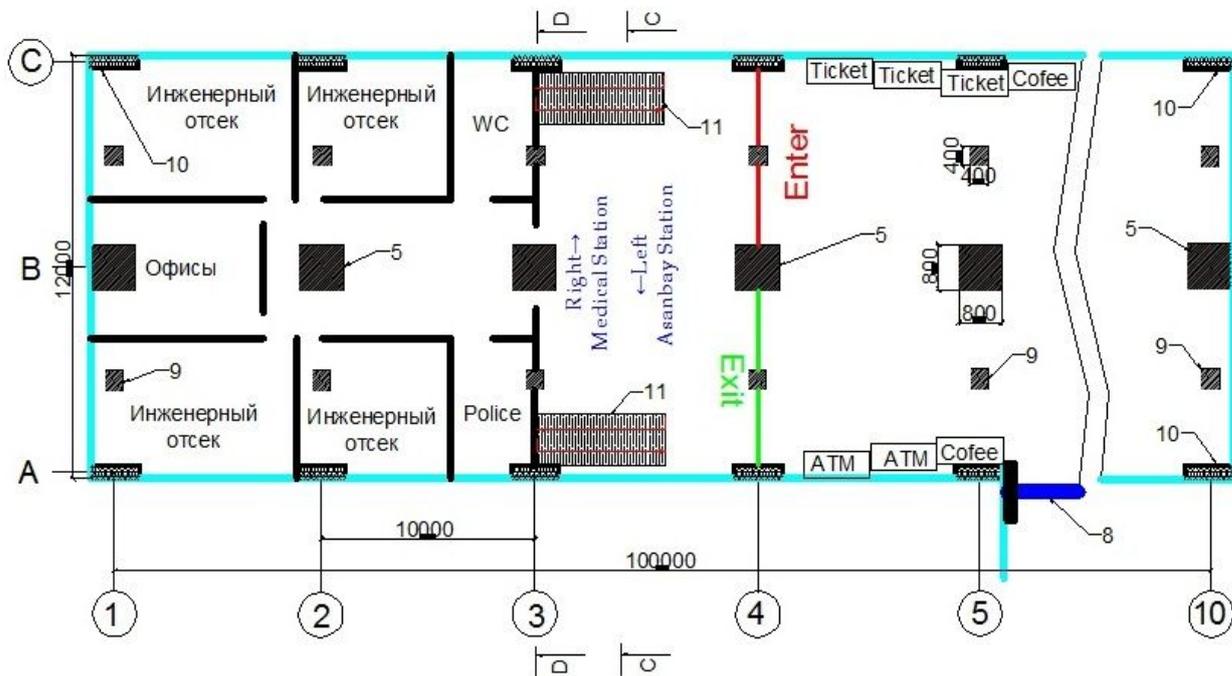


Рис. 6. План 1 уровня:

5 – опоры пролетного строения, 8 – gate, 9 – опоры платформы, 10 – металлические балки-арки, 11 – эскалаторы.

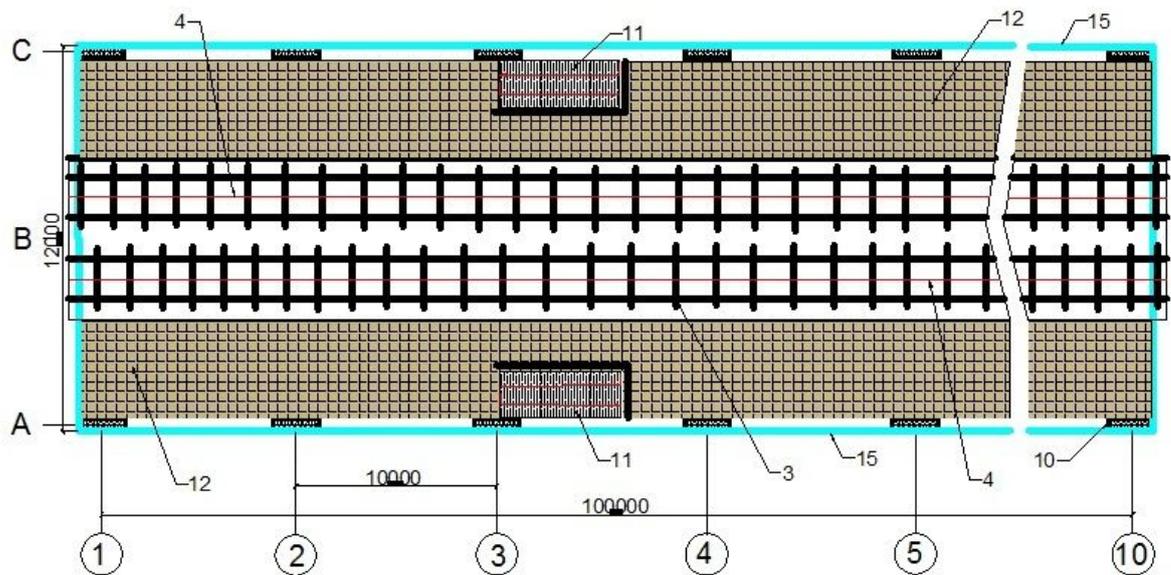


Рис. 7. План 2 уровня:

3 – бесбалластный путь, 4 – контактная сеть, 10 – металлические балки-арки, 11 – эскалаторы, 12 – платформа, 15 – стеклянные панели.

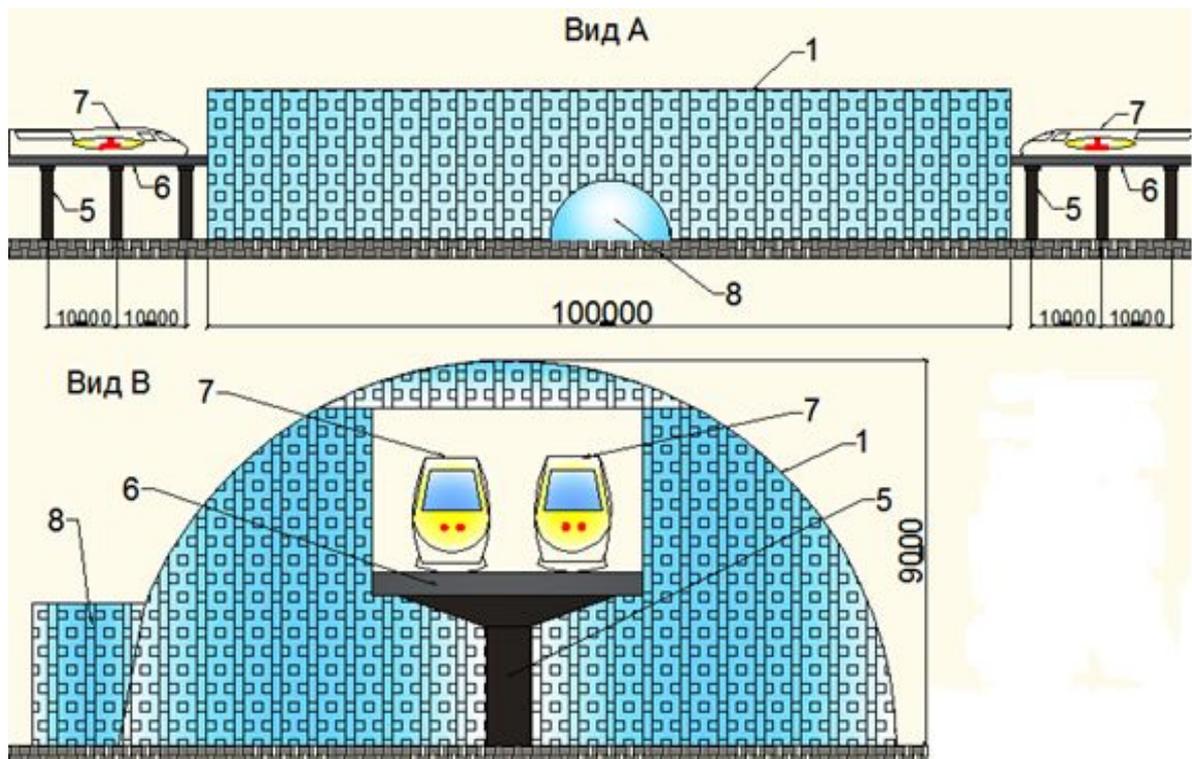


Рис. 8. Фасады станции:

1 – здание станции, 5 – опоры пролетного строения, 6 – пролетное строение, 7 – подвижной состав, 8 – gate.

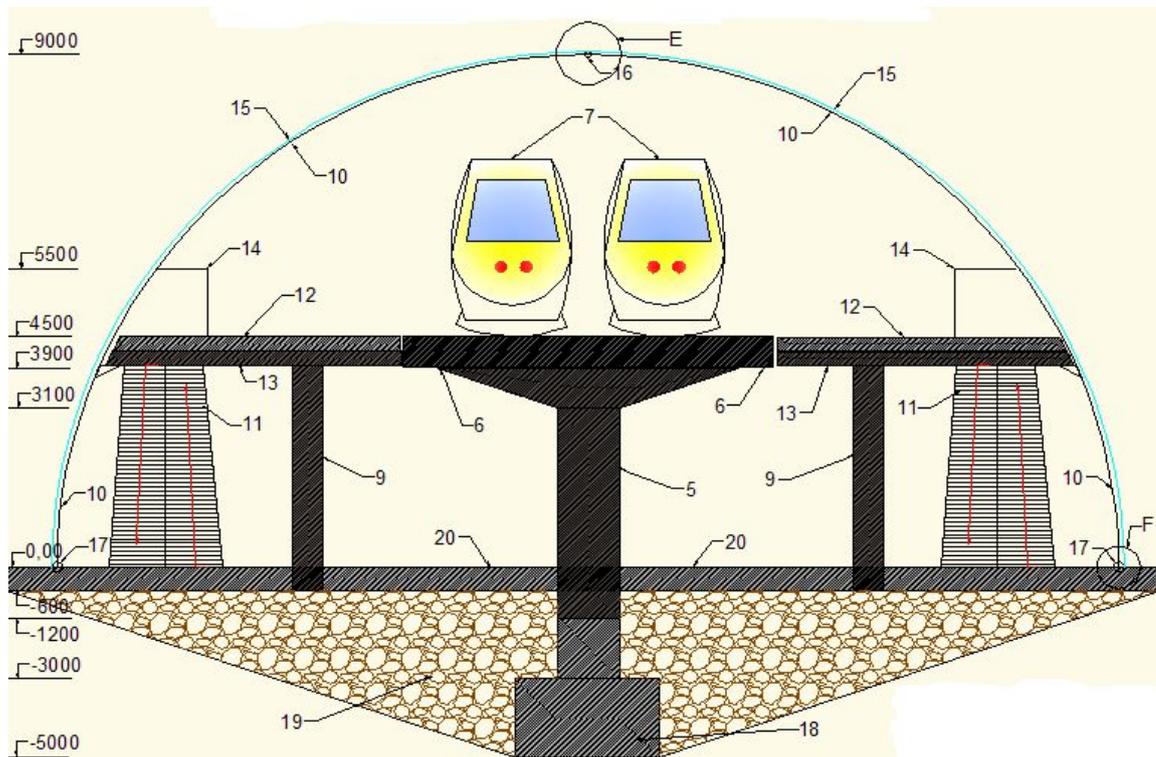


Рис. 9. Разрез станции:

5 – опоры пролетного строения, 6 – пролетное строение, 9 – опоры платформы, 10 – металлические балки-арки, 11 – эскалаторы, 12 – платформа, 13 – ригель платформы, 14 – перила, 15 – стеклянные панели, 16 – шарнирный узел кровельного сопряжения арок, 17 – шарнирный узел наземного сопряжения арок, 18 – фундамент, 19 – грунты основания, 20 – фундаментная плита.

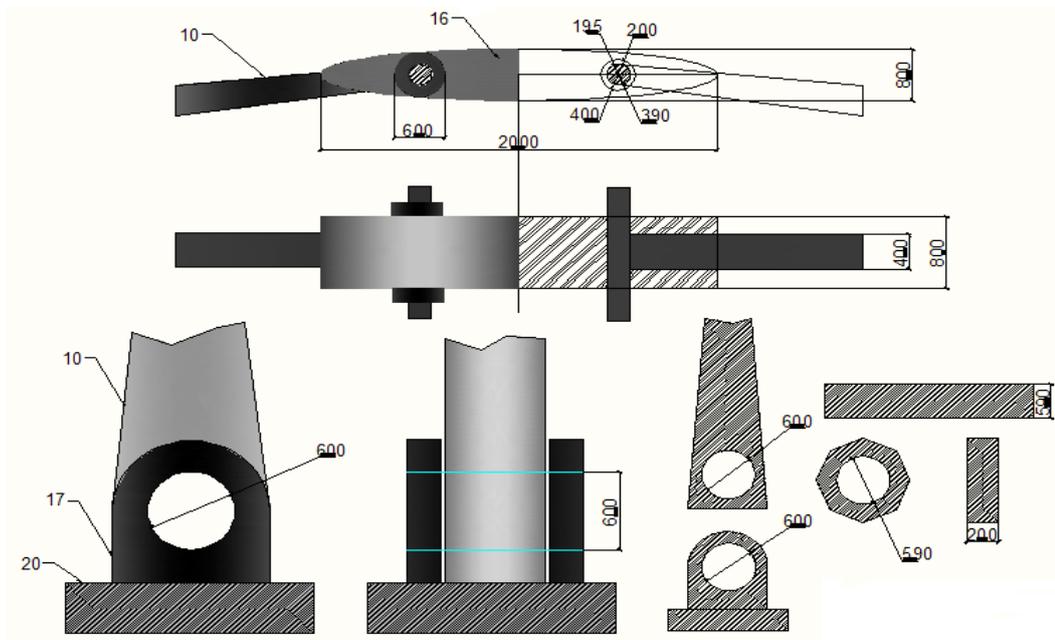


Рис. 10. Узлы Е, F :

10 – металлические балки-арки, 16 – шарнирный узел кровельного сопряжения арок, 17 – шарнирный узел наземного сопряжения арок, 20 – фундаментная плита.

**Конструкция железнодорожной станции высокоскоростной магистрали на северных перегонах в условиях высокого залегания грунтовых вод.** В современной транспортной логистике создается устойчивый тренд по созданию взаимно интегрированной и мультимодальной транспортной инфраструктуры. Например, Парижский метрополитен интегрирован с сетью высокоскоростного пригородного железнодорожного сообщения RER и сетью европейской высокоскоростной магистрали LGV. В этой связи автор рекомендует создание станции метрополитена, например станция «Дордой», интегрированной с сетью магистральных железных дорог.

Железнодорожные станции обрабатывают в единый момент времени огромное количество пассажиропотока. Это создает некоторые трудности в обеспечении логистики перемещения пассажиров, их обслуживания, что, в конечном счете, снижает эффективность станции как по безопасности, так в провозной способности сети железных дорог. Данная проблема актуализируется в современных условиях, когда население городов стремительно растет, растут миграционные потоки и все большее количество людей перемещаются по транспортным магистралям. Развитие гражданской авиации в большей степени решило эту проблему, однако, у авиации помимо самой высокой безопасности среди всех видов транспорта, есть существенный недостаток. Это неудобная локализация аэропортов вне городов, что создает для пассажиров серьезные трудности по неоправданному расходу времени. Также существенной проблемой является процедура паспортного контроля, что вызывает дополнительные задержки во времени. В постиндустриальных странах проблему обеспечения населения в транспортировке на средние расстояния и внутриконтинентальные перевозки решили созданием сети высокоскоростных железнодорожных магистралей, что дает железным дорогам возможность конкурировать с воздушным сообщением. Также немаловажным является то, что вокзалы располагаются внутри городов, преимущественно в центральных районах, что дает возможность пассажиру не тратить время на поездку в аэропорт, прохождение паспортного контроля в обеих точках, и убытия, и прибытия.

В условиях роста экономики стоит ожидать внедрения высокоскоростных магистралей в Центральной Азии. Например, ВСМ Бишкек-Алматы позволило бы пассажирам за один час доехать с центра города Бишкек до центра города Алматы, минуя транспортный трафик при въезде-выезде с обоих городов и трехчасовой маршрут по автомобильным дорогам.

В этой связи, существующие железнодорожные станции не способны к переработке новых логистических нагрузок. Требуется строительство новых железнодорожных транспортных узлов. Более того, использование существующих и классических конструктивных решений гражданского строительства неприемлемо, так как они не дают эффективную эксплуатацию внутреннего пространства. Также стоит учесть, что Кыргызстан локализован в сейсмически активной зоне, что требует разработки и внедрения методов сейсмостойкого строительства.

Разработанное автором конструктивное решение главного здания железнодорожной станции, имеющее согласно техническому решению круглоцилиндрическую форму и полурадиальный купол, оптимально решает проблему обеспечения сейсмостойкости сооружения и вписывается в условия эффективного распределения внутреннего пространства без создания громоздких несущих элементов конструкции. Из условий механики и сеймики, очевидно, что цилиндрическое сечение здания в плане оптимально распределяет вертикальные нагрузки. Вероятность развития опасных напряжений в несущих элементах конструкций минимальная. Для поддержания купола используются мостовые опоры в виде пилонов вантовых мостов, которые

поддерживают купол при помощи несущих тросов. Устойчивость таких конструкций проэкзаменованы опытом мостового строительства в условиях высокой сейсмичности и аэродинамичности районов строительства.

Ввиду нехватки свободных земель в Бишкеке и условиях долинной локализации, закономерным является то, что город будет развиваться до пределов границы с Казахстаном. Учитывая геологию и гидрологию этой местности, строительство тяжелых сооружений представляется невозможным без использования специальных мероприятий. Осушение территорий очень дорогостоящи и неоправданы с точки зрения подхода по внедрению эффективных пассивных систем строительства, где провозглашаются цели не противодействовать динамическим силам, а приспособляться к ним. По этой причине, по условиям конструкции, принято решение использовать свайные фундаменты, что тоже проэкзаменованы опытом работы в сложных гидрологических условиях.

Архитектурный облик железнодорожной станции соответствует культурному и геологическому фону Кыргызстана (опоры купола подобны минаретам мечетей, а сам купол является старейшим приемом по перекрытию), что актуально, учитывая тенденции по обезличиванию современного гражданского строительства, которое создает инженерные сооружения, не имеющие определенного архитектурного облика. Также стоит заметить, что советская «пост сталинская» архитектура была лишена всякой идеи в погоне за созданием типовых технологически выгодных решений, что вылилось в панельные коробки. В архитектурном облике и генеральном плане любого города, а тем более столицы государства, железнодорожные станции являются одним из наиболее значимых сооружений. По этой причине создание серой коробки недопустимо.

Техническое решение поясняется рисунками 11-19.

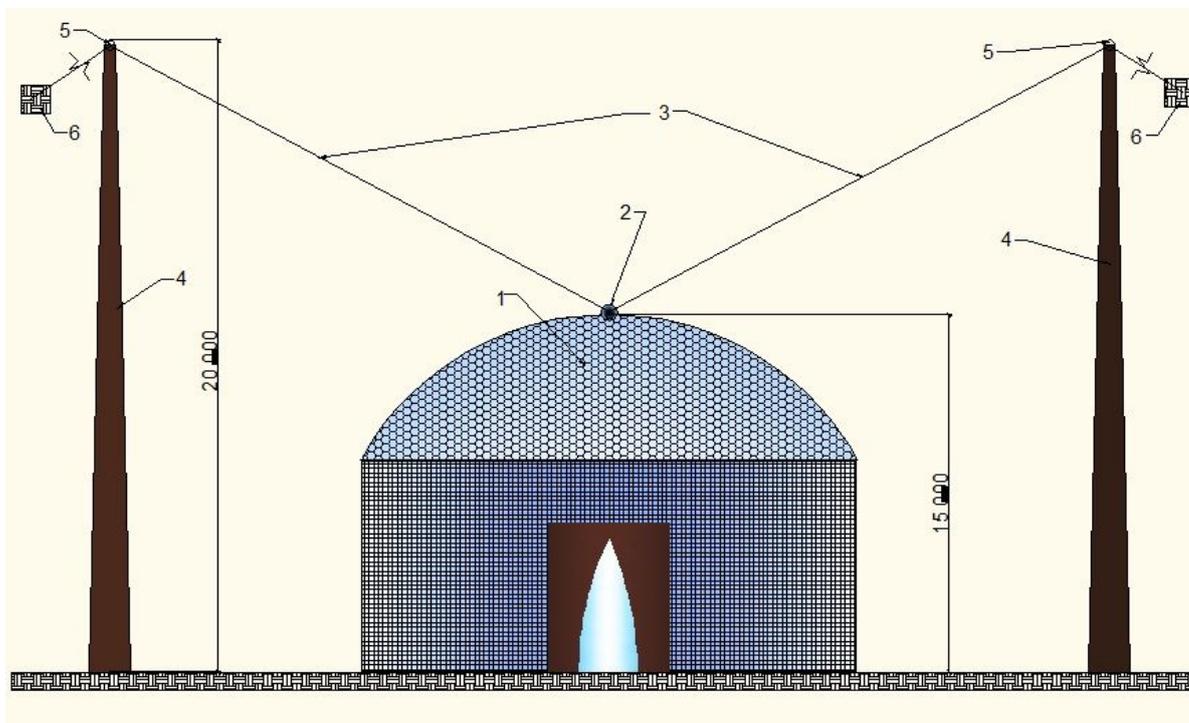


Рис. 11. Фасад здания станции

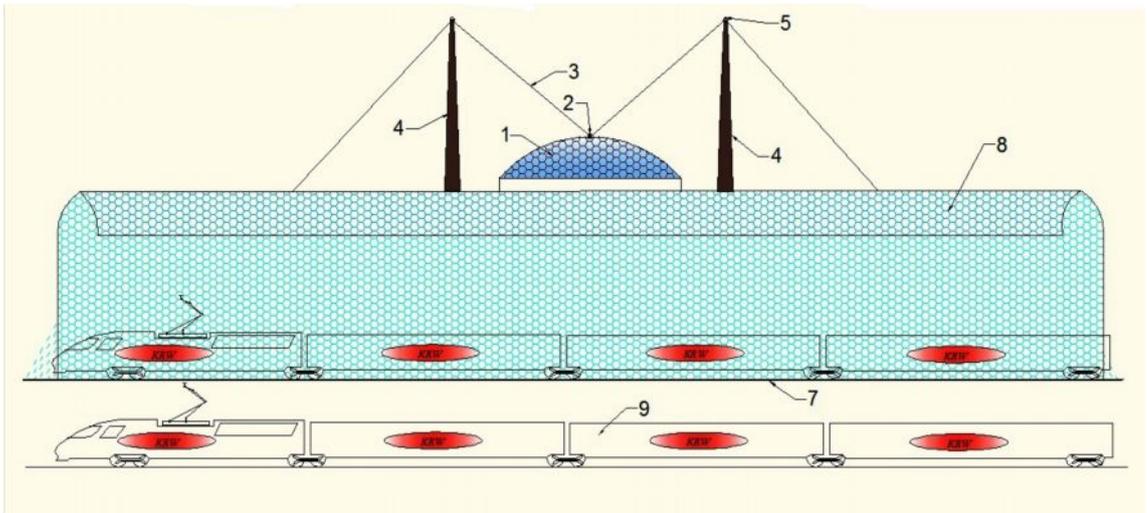


Рис. 12. Задний фасад здания станции

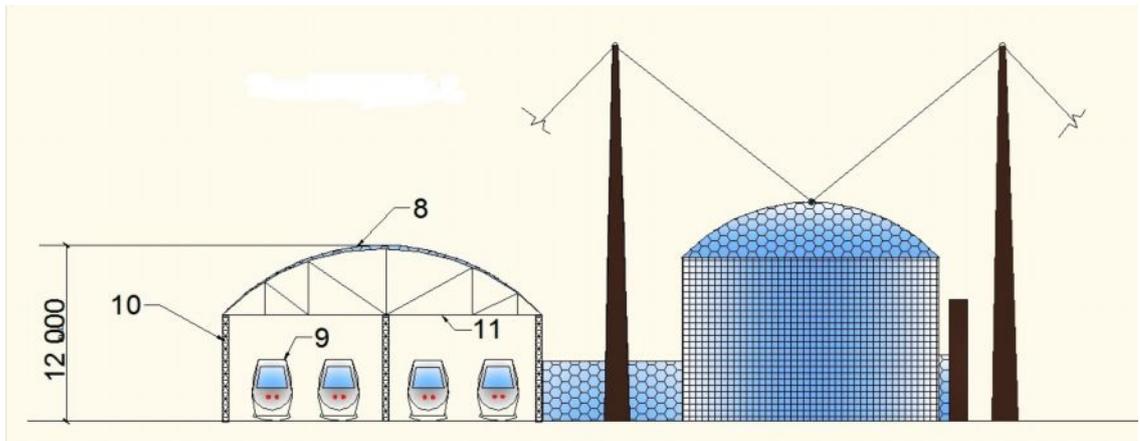


Рис. 13. Боковой фасад здания станции

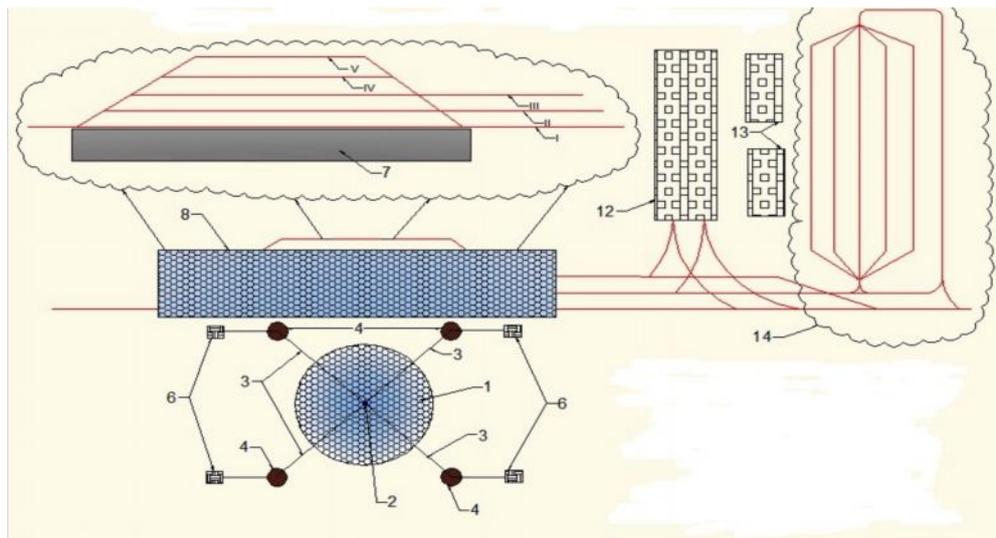


Рис. 14. План станции

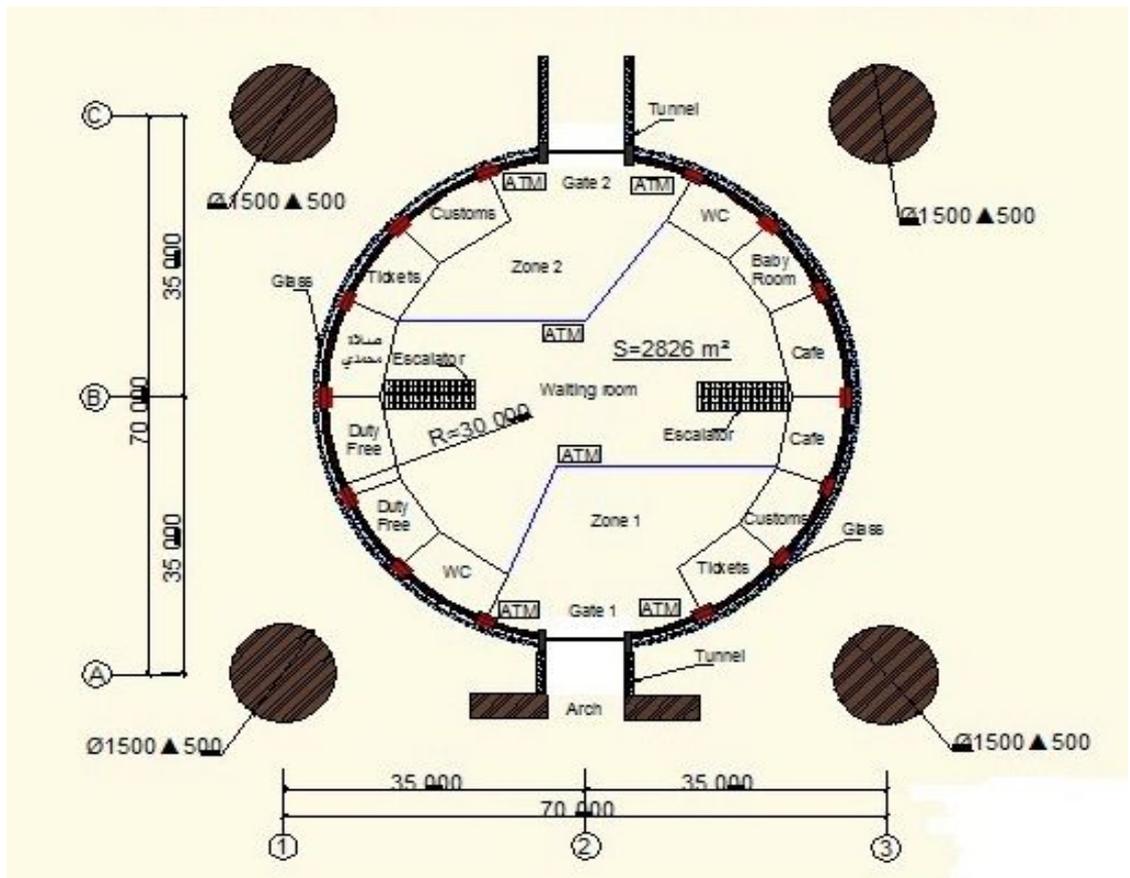


Рис. 15. План главного здания станции

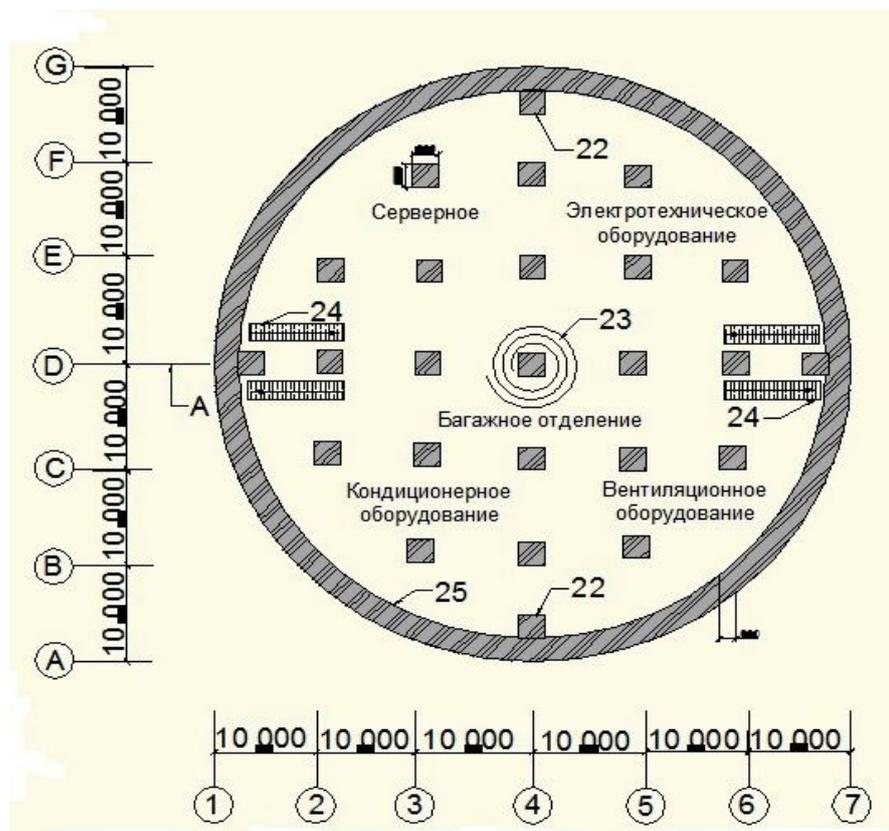


Рис. 16. План подземного уровня здания станции

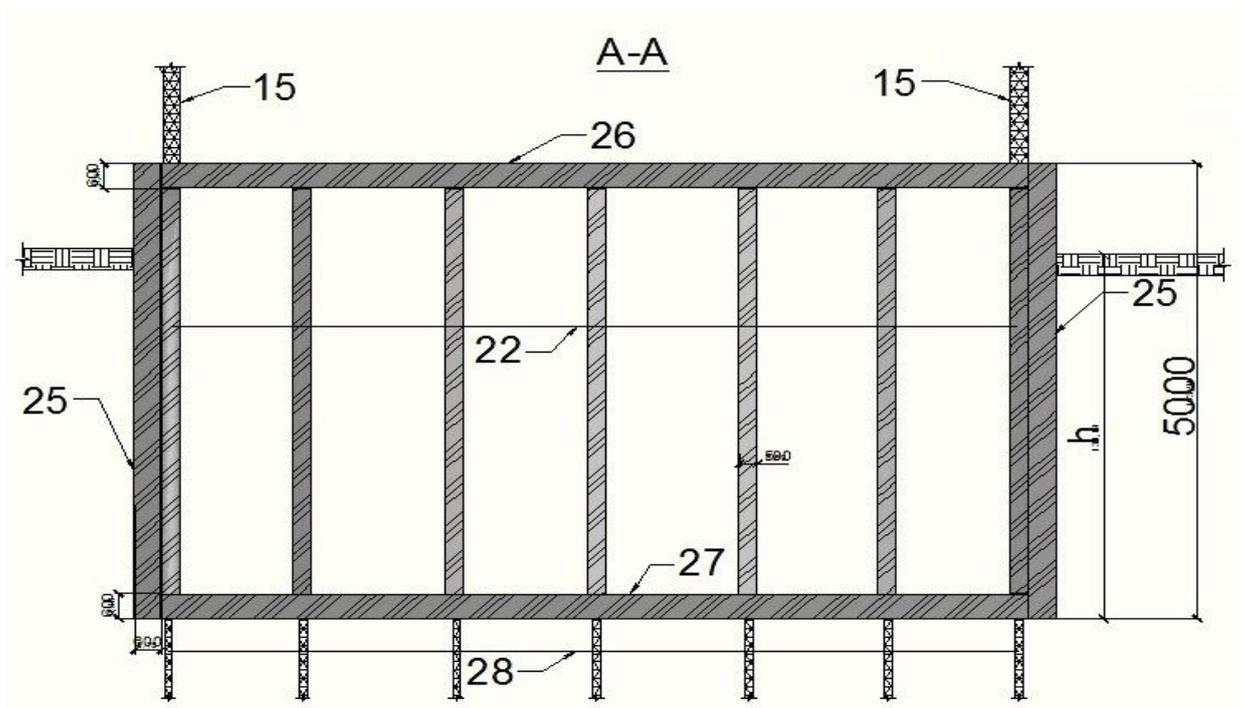


Рис. 17. Сечение А-А, вид подземного уровня

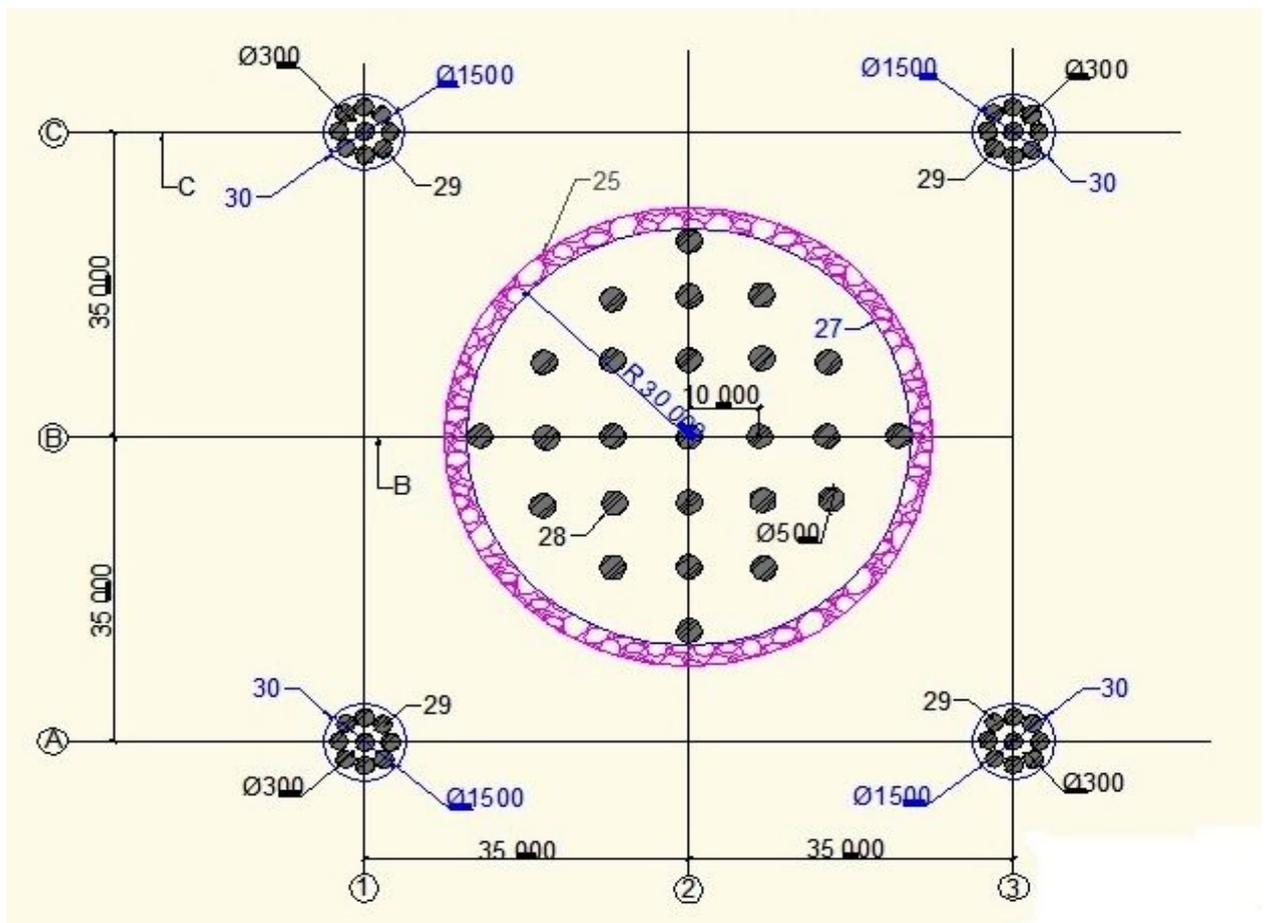


Рис. 18. План разбивки свай

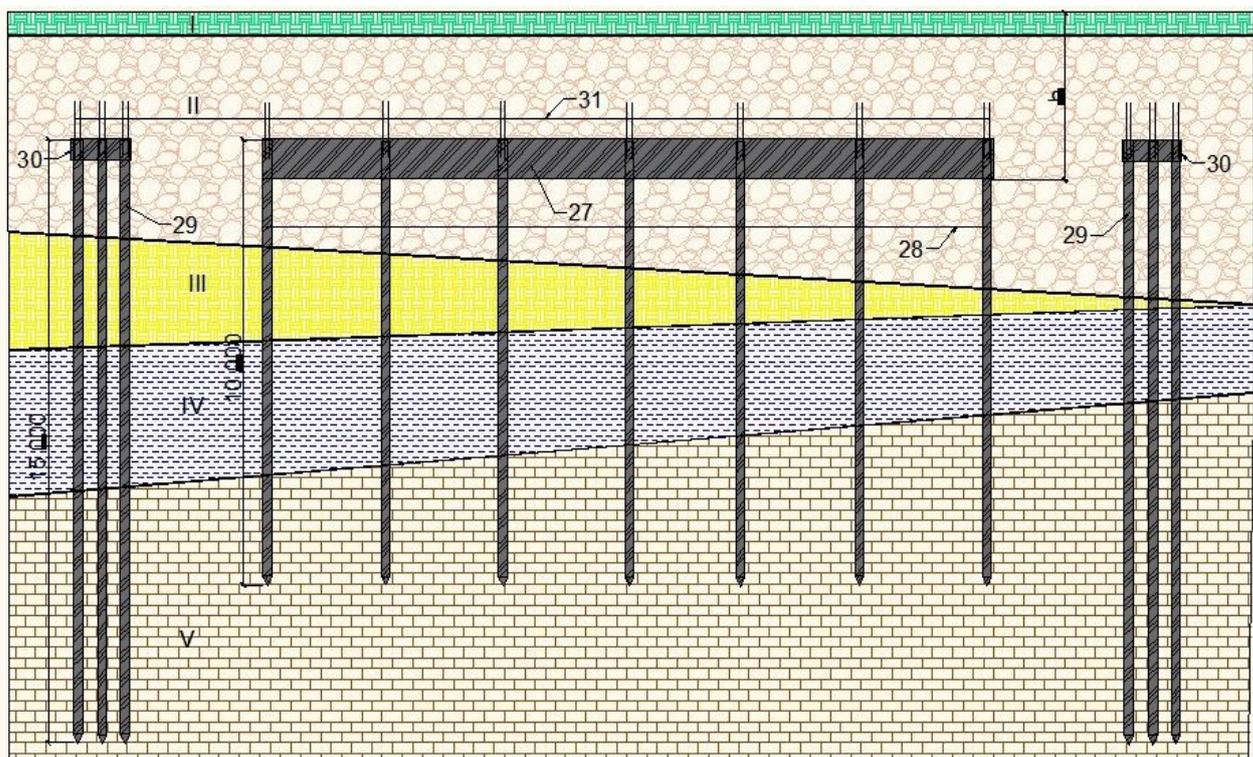


Рис. 19. Сечение В-В, вид свай

Расшифровка числовых обозначений рис. 11–19:

1 - стеклянный подвесной купол сотовой структуры; 2 - шарнирное ядро; 3 - несущие тросы; 4 - опоры купола; 5 - шарнирные узлы; 6 - жесткое защемление тросов в грунте; 7 - платформа; 8 - арочное перекрытие платформы; 9 - подвижной состав; 10 - опоры арочного перекрытия платформы; 11 - ферменная конструкция арочного перекрытия платформы; 12 - здание технического обслуживания автоматрисов и пассажирских вагонов; 13 - административные здания; 14 - зона парковки поездов, а также структурирования и расструктурирования автоматрисов и пассажирских вагонов, не имеющих монолитное сочленение по условиям конструкции; 15 - металлические колонны, 600x400; 16 - ригельные балки на уровне пола, 200x200; 17 - ригельные балки на уровне потолка, 200x200; 18 - аутриггерные радиальные балки, 200x200; 19 - радиальные ребра купола; 20 - арочные ребра купола; 21 - внутренние несущие тросы, сопряженные с основанием купола; 22 - жб колонны, 500x500; 23 - автоматический сортировщик багажа; 24 - эскалатор; 25 - стена в грунте; 26 - монолитная плита перекрытия; 27 - монолитная фундаментная плита главного здания; 28 – сваи главного здания; 29 – сваи опор купола; 30 – фундаментная плита опоры купола; 31 – арматурные выходы для монтажа железобетонных колонн; h – глубина котлована; I – почва; II – лессовый грунт; III – пылеватые суглинки; IV – грунтовые воды; V – корневой скальный грунт.

**Инерционное демпфирование железнодорожного пути в целях сейсмической изоляции.** Ключевой конструкцией метрополитена является железнодорожный путь. Вопросы сейсмостойкости и устойчивости железнодорожного пути в динамике нагрузок по актуальности не вызывает сомнений. Ниже предлагается конструкция сейсмостойкого успокоителя колебаний железнодорожного пути, что можно внедрить при строительстве городского метрополитена как при наземном трассировании, так и при надземном, в теле искусственных сооружений.

Железнодорожный путь представляет собой сложную систему из грунтовых сооружений, железобетонного основания пути, стальных балок сложного сечения рельсов и различных искусственных сооружений, предназначенных для защиты пути от условий

геологии, гидродинамики, аэродинамики, гляциологии и других опасных экзогенных, эндогенных процессов. В процессе эксплуатации железнодорожный путь воспринимает наравне со статическими воздействиями сильные динамические нагрузки. В условиях Кыргызстана наиболее актуальным из них является сейсмическая нагрузка. Сейсмические колебания с магнитудой более 6 происходят в Кыргызстане очень часто и согласно отчету института сейсмологии землетрясения с магнитудой 7-8 произойдут с высокой долей вероятности. Деформации железнодорожного пути от действия сейсмических сил довольно хорошо изучены и представляют собой нарушение геометрии пути, как по вертикали, так и в горизонтальной плоскости. Пластические деформации грунтового сооружения сопряжены с физико-механическими характеристиками осадочных горных пород, из которых, как правило, сооружают земляное полотно железных дорог. Значительное линейное развитие грунтовых сооружений также является фактором повышенного риска развития пластических деформаций. Так как разные участки железных дорог при действии сейсмических сил воспринимают отличные от соседних участков нагрузки по частотным и силовым параметрам. Когда происходят пластические деформации грунтового основания пути железобетонные и металлические конструкции, известные как верхнее строение пути или рельсо-шпальная решетка, лишаются основания, следствием чего становится неизбежное нарушение целостности конструкций, что и можно охарактеризовать как деформация пути или нарушение его геометрии. В случаях, когда это происходит при движении по железнодорожному пути подвижных составов, сход с рельсов поездов вполне ожидаемый процесс, результатом чего станут значительные человеческие жертвы.

Другой актуальной проблемой в обеспечении устойчивости железнодорожного пути является подвижная динамическая нагрузка. Железная дорога и все сопутствующие искусственные сооружения подвергаются постоянной подвижной нагрузке. Степень интенсивности подвижной нагрузки напрямую зависит от транспортно-логистической нагрузки всей сети железных дорог, что является следствием роста экономики и развития торговли. В этих условиях в целях обеспечения все более растущих потребностей рынка в транспортных услугах необходима глубокая модернизация существующей транспортной инфраструктуры, состояние которой по самым благоприятным оценкам далека от требуемых параметров. Действие подвижной нагрузки на железнодорожный путь в первом приближении можно сравнить с действием сейсмических сил. Подобие двух динамических составляющих этих нагрузок можно характеризовать в резонансных колебаниях конструкций сооружений и чем больше вес подвижного состава и его скорость, тем выше значения по критериям подобия к сейсмическим силам.

В этой связи существует необходимость защиты железнодорожного пути от опасных динамических нагрузок. В этой работе предлагается использовать наиболее перспективное направление по активному противодействию сейсмическим и иным динамическим силам. Инерционные гасители показали высокую эффективность в сейсмостойком строительстве и проэкзаменованы сильнейшими землетрясениями. Наиболее яркая практика применения инерционных гасителей известна в высотном сооружении Тайбей 101, где использован груз весом 660 т на верхних уровнях здания.

Предлагаемое техническое решение «Сейсмостойкий успокоитель колебаний железнодорожного пути» предназначен для практической реализации принципов активного противодействия сейсмическим силам. Реализация этого проекта возможна на электрифицированных железных дорогах, т.к. по условиям конструкции инерционный гаситель локализуется внутри опоры линии контактной сети железных дорог. Потому что строительство дополнительных опор для инерционного гашения колебаний представляется необоснованным с экономической точки зрения. В целях повышения сейсмостойкости существующих железных дорог с существующими опорами контактной сети возможен вариант локализации инерционного гасителя в теле опоры. При строительстве метрополитена рекомендуется интегрировать инфраструктуру успокоителя колебаний в теле эстакад и опор контактной сети.

Конструктивно инерционный успокоитель колебаний представляет собой цилиндр весом 200 кг, подвешенный на тросы и опертый на пружинное основание. Конструкция

размещается внутри опоры линии контактной сети железных дорог. Передача колебаний от железнодорожного пути к инерционному гасителю осуществляется посредством поперечной балки, которая жестко закреплена в опорной части. Сама поперечная балка с одной стороны закреплена к опоре, с другой стороны замещает собой железнодорожную шпалу и опирается на земляное полотно и является основанием для рельсов. При прохождении подвижных составов возбуждаемые ими продольные и поперечные нагрузки передаются по балкам-шпалам к опорной части, где размещен инерционный гаситель. Эти нагрузки воспринимаются опорами и передаются через пружинное основание и тросы на груз, который колеблется с периодом, формой и частотой колебаний, отличными от периодов, форм и частоты колебаний железнодорожного пути, что предотвращает развитие резонансных явлений на теле самого железнодорожного пути. По своей сути инерционный гаситель воспринимает колебания пути на себя, колеблется сам и затухает, при этом происходит, во-первых, гашение опасных колебаний, во-вторых, не возникают опасные резонансные колебания пути. Амплитудно-частотные характеристики напрямую зависят от веса гасителя, величины передаваемой кинетической энергии и физических пределов амплитуды колебаний гасителя, что можно регулировать ограничителями. Теоретические исследования и их проверка в численных симуляционных средах показали оптимальный вес груза в 200 кг для железных дорог, где вес брутто подвижных составов не превышает 5000 т. При этом размещение инерционных гасителей на каждой опоре линии контактной сети обязательно с шагом, соответствующим шагу опорных частей.

Противодействие сейсмическим силам происходит по аналогичной схеме, лишь с поправкой, что возбуждаемые колебания передаются из грунтов основания к земляному полотну, далее на поперечные балки-шпалы. Тут очевидно происходит вертикальная передача кинетической энергии, что обуславливается механизмами передачи сейсмических сил на вертикальные сооружения. Техническое решение поясняется рисунками 20-21. Результаты расчетов и численных экспериментов приведены в сравнительных графиках.

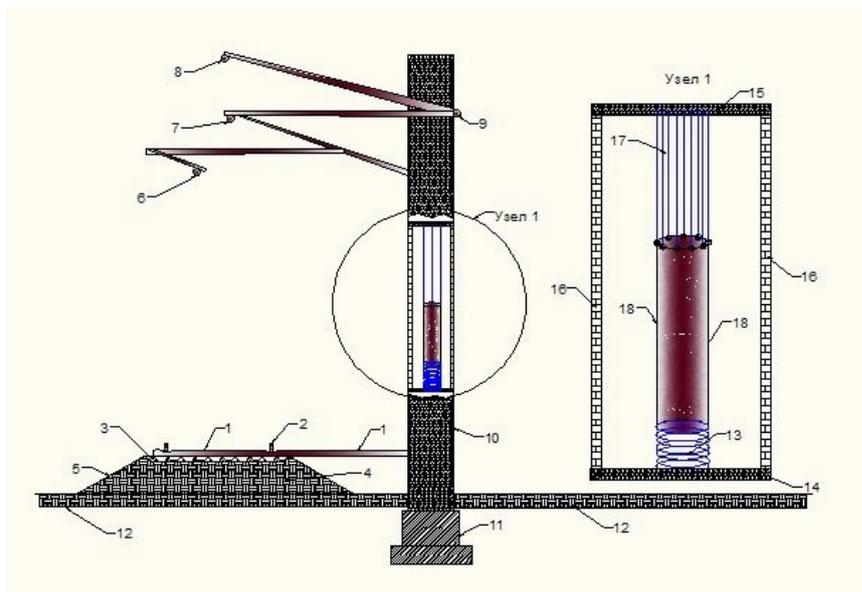


Рис. 20. Сейсмостойкий успокоитель колебаний железнодорожного пути:

- 1 - поперечная балка-шпала; 2 - рельс; 3 - балластная призма; 4 - земляное полотно; 5 - откос земляного полотна; 6 - контактный провод; 7 - несущий трос; 8 - отсасывающий провод; 9 - обратный провод; 10 - несущая опора; 11 - фундамент опоры; 12 - грунты основания; 13 - пружинный демпфер; 14 - основание пружинного демпфера; 15 - основание подвесных тросов; 16 - обшивка из демпфирующего материала; 17 - подвесные тросы; 18 - инерционный успокоитель колебаний  $m=200$  кг.

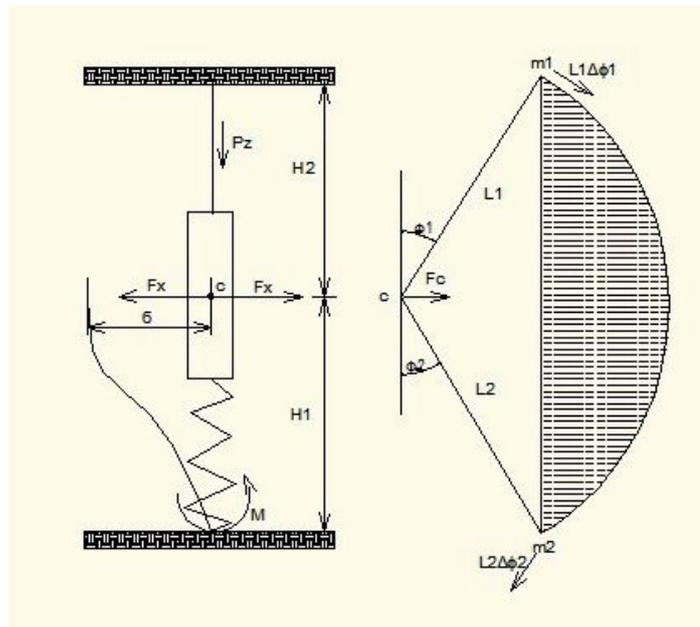


Рис. 21. Расчетная схема предложенного технического решения

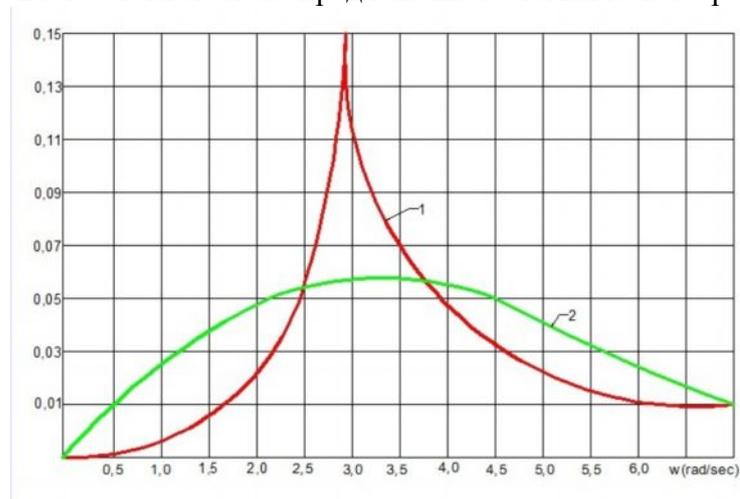


Рис. 22. Колебания жд пути при действии продольной поперечной сейсмической нагрузки  $M=7,0$

- 1 – жд путь без инерционного гасителя;
- 2 – жд путь с инерционным гасителем

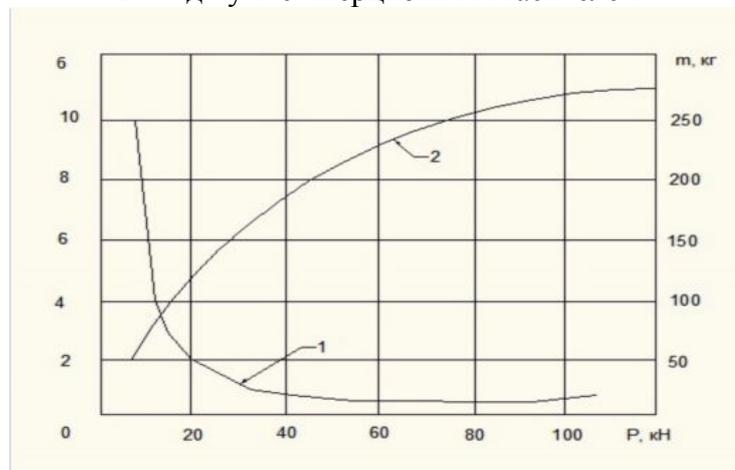


Рис. 23. График зависимости декремента инерционного гасителя от его веса:  
1 - декремент гасителя; 2 - вес гасителя.

**Расчетное обоснование предложенного технического решения.** Наиболее перспективным для гашения колебаний сооружений с собственными периодами  $T_0 \geq 2$  с, или частотами собственных колебаний  $f \leq 0,5$  Гц используют динамические гасители в виде маятника с демпфированием. Уравнение колебаний такого гасителя имеет вид /2/

$$\varphi + 2n\dot{\varphi} + \frac{g}{m_1 + m_2} \left( \frac{m_1}{l_1} - \frac{m_2}{l_2} \right) \varphi = 0 \quad (1)$$

где  $\varphi$  — угловое отклонение гасителя от положения равновесия;  $m_1$  — верхняя (наружная) масса гасителя колебаний;  $m_2$  — нижняя (внутренняя) масса гасителя колебаний;  $l_1$  и  $l_2$  — длина подвески соответственно верхней и нижней массы;  $g$  — ускорение свободного падения;  $n = \alpha/[2(m_1 + m_2)]$ ,  $\alpha$  — коэффициент сопротивления демпфера гасителя.

Декремент колебаний гасителя, характеризующий его демпфирующие свойства, определяют по формуле

$$\delta = n\tau_1 = \frac{\alpha}{\sqrt{\left(\frac{\omega}{n}\right)^2 - 1}} \quad (2)$$

где  $\tau_1$  — период колебаний гасителя с демпфированием.

При этом  $\tau_1$  находят из выражения

$$\tau_1 = \tau_0 \sqrt{\frac{1 + \delta^2}{4\pi^2}} \quad (3)$$

в котором  $\tau_0$  — период колебаний гасителя без демпфирования. Из формулы (3) следует, что при  $\delta=1$  (наиболее часто встречающаяся величина декремента колебаний реальных гасителей колебаний) т.е.  $\tau_1$  и  $\tau_0$  различаются на 1,26 %. Поэтому для динамических гасителей колебаний влияние демпфирования на период (частоту) колебаний можно не учитывать. Подставляя в (2) выражения для  $\omega$  и  $n$ , получаем

$$\delta = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{4gM}{\alpha^2} \left( \frac{m_1}{l_1} - \frac{m_2}{l_2} \right)}}, \quad (4)$$

где  $M=m_1+m_2$ . Решив (4) относительно  $\alpha$ , имеем

$$\alpha = \frac{\delta}{\pi} \sqrt{gM \left( \frac{m_1}{l_1} - \frac{m_2}{l_2} \right)}. \quad (5)$$

Выражение (5) показывает зависимость величины коэффициента трения гасителя колебаний, определяемого конструктивными особенностями и размерами используемых демпферов, от массовых и геометрических параметров гасителя колебаний. Частоту

собственных колебаний инерционной массы гасителя можно вычислить из уравнения (1) следующим образом

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{m_1 + m_2} \left( \frac{m_1}{l_1} - \frac{m_2}{l_2} \right)}. \quad (6)$$

С учетом (6) выражение (5) приведем к виду

$$\alpha = \frac{M\omega\delta}{\pi} \quad (7)$$

С помощью выражения (7) можно, например, исследовать зависимость геометрических параметров цилиндров-демпферов гасителей колебаний от величины инерционной массы гасителя  $M$ . Решая (7) относительно величины  $\delta$ , получим

$$\delta = \frac{\pi\alpha}{(M\omega)} \quad (8)$$

Зависимость (8) для различных значений  $M$  при постоянных  $\alpha$  и  $\omega$  представлена на рисунке 5 (кривая 1). При этом величина  $\alpha$  принята равной 3330 Н•с/м, что соответствует  $\alpha$  для демпфера гасителя колебаний весом 100 кН. Эта величина постоянная для любых значений инерционной массы гасителей колебаний в пределах от 100 до 5 кН. Для гасителя колебаний весом 100 кН принимаем  $\omega = 0,17$  Гц, а для других гасителей в диапазоне инерционных масс от 100 до 5 кН величина  $\omega$  постоянная и равна 0,33 Гц.

**Выводы.** По итогам этой исследовательской работы получены следующие научно обоснованные выводы:

1. Население города Бишкек имеет тенденцию к росту, соответственно нагрузки на транспортную инфраструктуру склонны расти. По этой причине г. Бишкек нуждается в строительстве метрополитена и его обоснованность не вызывает сомнений. В целях удешевления проекта нужно остановиться на наземных и надземных вариантах конструкций метрополитена. Правительству необходимо объявить тендер на разработку ТЭО и поиск инвесторов в Турции или КНР.
2. Разработанная конструкция вантового аэростатического тоннеля имеет научную новизну и защищена авторским свидетельством – патент КР № 118 (21) 20100029.2 (51) E 21D 9/14, E 01 D 11/02. Использование предложенной конструкции позволит перекрывать пролеты до 500 м, тогда как существующие вантовые мостовые сооружения перекрывают 350 м.
3. Практическое применение предложенного конструктивного решения станции круглоцилиндрической формы с радиальным куполом сотовой структуры позволит эффективно перекрыть сооружение без устройства громоздких несущих элементов конструкции и тем самым улучшить показатель использования внутреннего пространства здания. Повысит сейсмостойкость здания на 30 % в сравнении с известными конструкциями. Позволит свести к минимуму влияние грунтовых вод и слабого основания в связи с использованием свайных фундаментов. Повысит пропускную способность пассажиропотока, как станции, так и всей сети железных дорог.
4. Практическое применение предложенного технического решения «Сейсмостойкий успокоитель колебаний железнодорожного пути» позволит снизить сейсмическую нагрузку при магнитуде 7 на 30 %, при магнитуде 6 на 38 %, при магнитуде 5 на 43 %.

Сокращение усилий при подвижной нагрузке при условии проезда подвижных составов весом брутто до 5000 т будет порядка 50 %.

#### **Список литературы**

1. Иманалиев Т.Б. (Т. Болотбек). Сейсмостойкость искусственных сооружений [Текст] / Т.Б. Иманалиев (Т. Болотбек). - Бишкек: Илим, 2010. – 211 с.
2. Патент КР № 118 (21) 20100029.2 (51) E 21D 9/14, E 01 D 11/02. Т.Б. Иманалиев (Т. Болотбек).
3. Иманалиев Т.Б. (Т.Болотбек). Сейсмостойкий успокоитель колебаний железнодорожного пути [Текст] / Т.Б. Иманалиев (Т. Болотбек). - Вестник КГУСТА. Вып. 1 (40). – Бишкек: КГУСТА, 2013. – С. 31-38.
4. Т. Болотбек. Конструкции железнодорожных станций в условиях структурно неустойчивых грунтов [Текст] / Т. Болотбек. - Вестник КГУСТА. Вып. 3 (45, том 2). – Бишкек: КГУСТА, 2014. – С. 48-54.