

Транспортный переход через пролив Невельского - мост или тоннель?

Проект планетарного масштаба – строительство транспортного перехода от материка на Сахалин, возможно станет следующим знаковым и амбициозным сооружением после Керченского моста. Эксперты обсуждают плюсы и минусы вариантов перехода с материка на Сахалин и о том, будет это мост или тоннель.

Предлагаем вашему вниманию уникальное инженерное объединение мнений двух кафедр “Мосты” и “Тоннели и метрополитены” факультета “Транспортное строительство” ПГУПС.

Тоннель или мост? Авторы предлагают обсудить и дать ответ на этот вопрос в цикле статей с объединением данных из разных источников, сформированных в единый формат. Как правило, статьи на представленную тему публикуются отдельно экспертами из области мостостроения или тоннелестроения.

Рекомендации по структуре – 3 части – 3 статьи.

Часть 1. Природно-климатические факторы и источники финансирования для строительства транспортного перехода через пролив Невельского

Часть 2 Возможные варианты конструктивно-технологических решений транспортного перехода между островом Сахалин и материковой частью Российской Федерации

Часть 3. Анализ стоимости строительства мостовых и тоннельных транспортных переходов

Шестакова Екатерина Борисовна , к.т.н., доцент кафедры «Мосты» и кафедры «Тоннели и метрополитены» Петербургского государственного университета путей сообщения императора Александра I, 190031, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., 9, ekaterinamost6@gmail.com, +79210945106
--

Новиков Анатолий Леонидович , старший преподаватель кафедры «Тоннели и метрополитены» Петербургского государственного университета путей сообщения императора Александра I, 190031, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., 9, e-mail: pgupstm@yandex.ru
--

Антонюк Анатолий Анатольевич , аспирант кафедры «Мосты» Петербургского государственного университета путей сообщения императора Александра I, 190031, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., 9, e-mail: aaa.12.03.1992@mail.ru, +79990251833

Курчанов Павел Олегович , студент 5 курса кафедры «Мосты» Петербургского государственного университета путей сообщения императора Александра I, 190031, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., 9, Тел. +7911-199-37-60, e-mail: pavel-kurchanov@yandex.ru
--

Содержание

В статье обсуждаются вопросы с высокой степенью подготовки по проектированию, строительству и эксплуатации искусственных сооружений транспортной инфраструктуры, в сложных природно-климатических условиях района Сахалина с большой продолжительностью зимнего сезона с обильными зимними осадками, опасными отложениями гололеда и льдонамерзания, а также с учетом высокой сейсмической активности территории.

Авторами представлены результаты работы по оценке вариантов развития транспортной инфраструктуры путем обеспечения сообщения материковой части Российской Федерации и острова Сахалин через пролив Невельского, с обоснованием варианта решения проблемы транспортного перехода и оценкой альтернативы «тоннель-мост». Эффективность решения predetermined в использовании двух основных вариантов: тоннель (или тоннель-дамба) и совмещенный вариант тоннель-мост; двух статических схем с учетом уникальности, III категории сложности, неоднородности структурно-тектонической условий транспортного перехода для материковой и островной частей.

При проектировании транспортных объектов для Сахалина должны приниматься во внимание специфические особенности, а именно сложные климатические условия, своеобразие экономико-географического положения (единственная в России область на островах, близость Японии и других быстро развивающихся стран АТР), сложившаяся структура хозяйства, уникальность ресурсного потенциала (биологические и углеводородные ресурсы шельфа имеют региональное и общероссийское значение), экономическое и социальное развитие, комплексное освоение и развитие минерально-сырьевой базы Дальнего Востока, промышленное развитие регионов, логистические схемы и перспектива грузооборота (сценарий «Евразийский мост») и потенциал развития туристической отрасли.

Одним из ограничивающих факторов строительства транспортных искусственных сооружений для Сахалина являются неблагоприятные погодные условия, которые уменьшают доступность рабочих мест, усложняют выполнение многих видов строительно-монтажных работ, увеличивают опасность на строительных площадках, ограничивают или полностью исключают работу подъемных кранов, подвергают опасности разрушений сооружения, затрудняют передвижение ремонтновосстановительных бригад и введение в строй поврежденных объектов, увеличивают расход электроэнергии.

Применение инновационных технологий для решения инженерных задач будут ориентированы на требования, предъявляемые к современным искусственным сооружениям: надежность и долговечность, безопасность и экономичность на протяжении всего жизненного цикла. Выбор оптимального варианта с учетом альтернатив «тоннель-мост» будет проводиться по технико-экономическим показателям суммарных, строительных и эксплуатационных затрат, включая срок окупаемости, затрат на чрезвычайные ситуации, сейсмической и экологической безопасности и инвестиционной ответственности за расчетный период эксплуатации.

Введение. Вопрос строительства транспортного перехода на Сахалин обсуждается уже несколько десятилетий. Переправа на Сахалин — чрезвычайно важный проект, как с геополитической, так и геоэкономической точки зрения. В последнее время Россия обращает все больше внимания на Дальний Восток, реализовав там ряд проектов. Но развитость региона все еще оставляет желать лучшего: в сфере транспортного, промышленного, социально-экономического и туристического развития. Для самого Сахалина транспортный переход также крайне важен — в настоящее время этот регион практически оторван от материковой России, связи и контакты с „большой землей“ сильно ограничены. Однако, рассматриваемый регион очень важен, как край, богатый ресурсами, и как приграничная зона нашей страны. Более того, наличие сообщения между материковой частью страны и островом Сахалин будет являться неким катализатором в развитие политических, а главное экономических отношений между Россией и Японией. В перспективе развития Сахалинской области запланированы создание лесозаготовительных и деревообрабатывающих предприятий; развитие Солнцевского угольного разреза с одновременным строительством и развитием других угледобывающих предприятий района; организация цементного производства; строительство предприятий по углехимической переработке бурых углей и др. В то же время, транспортная составляющая в стоимости продукции, производимой и потребляемой на Сахалине, настолько значительна, что экономика острова

спонтанно все больше ориентируется на страны Азиатско-тихоокеанского региона, нежели на внутренний российский рынок. В результате, в последние годы проявляется тенденция к обособлению этой островной области РФ от экономического пространства страны. В настоящее время грузы с материка на Сахалин и обратно перевозятся по железнодорожно-паромной линии Ванино – Холмск. Действующая паромная переправа из-за тяжелых погодных условий фактически работает всего полгода и при мощности 3,3 млн. тонн перевозит около 1,5 млн. тонн грузов в год. Появление транспортного перехода на материк увеличит грузопоток до 9,2 млн. тонн, что относительно мало, учитывая стоимость строительства. Вместе с тем, возможное строительство железнодорожно-автомобильного перехода на японский остров Хоккайдо создаст новый трансевразийский транспортный коридор и может довести перевозки через Сахалин до 33-40 млн. тонн в год, 25 млн. тонн из которых будет составлять российский экспорт в Японию.

Ключевые слова: транспортный переход, инженерно-геологические и природно-климатические условия, Сахалин, т

Часть 1. Природно-климатические факторы и источники финансирования для строительства транспортного перехода через пролив Невельского

1 Источники финансирования для строительства транспортного перехода

Как и любое другое сообщение (мост, тоннель или паромная переправа) для достижения максимально перспективного уровня транспортного, грузового и пассажиропотока необходимо не одно десятилетие. В качестве яркого примера, в защиту обеспечения транспортного сообщения между материковой частью страны и острова Сахалин, рассмотрим Эресуннский мост между Данией и Швецией. Данный транспортный переход представляет собой совмещенный мост-тоннель, включающий двухпутную железную дорогу и четырехполосную автомагистраль через пролив Эресунн. Это самая длинная совмещенная дорога и железнодорожный мост в Европе, соединяющие столицу Дании Копенгаген и шведский город Мальмё. На рис. 1 представлены поперечные сечения совмещенного сооружения между Данией и Швецией через пролив Эресунн: двухуровневого моста (на верхнем ярусе - а.д., нижнем – ж.д.) и тоннеля.

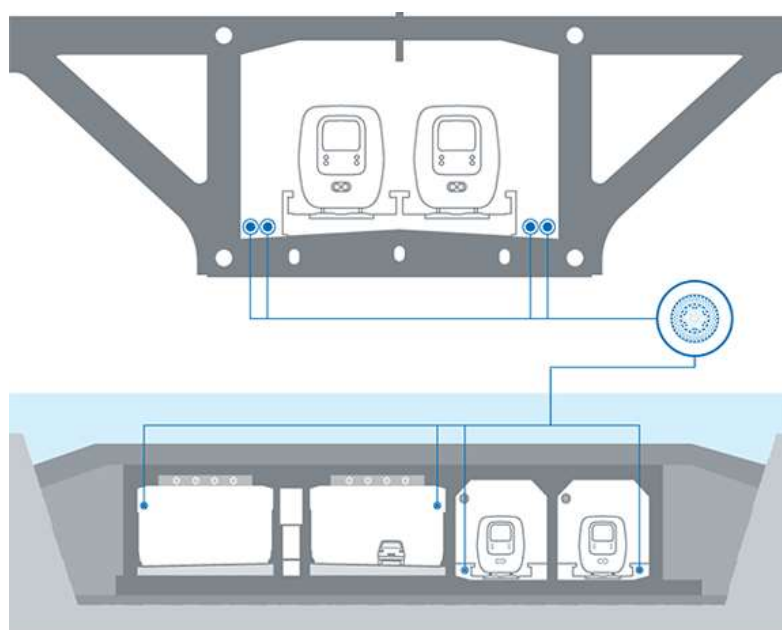


Рис. 1 Поперечные сечения совмещенного сооружения мост-тоннель между Данией и Швецией через пролив Эресунн.

На протяжении первых 15 лет эксплуатации данного объекта наблюдается увеличение транспортного потока в 2-3 раза. Динамика роста транспортных потоков представлена на рисунках 1-3. Так из диаграмм видно, что среднесуточная интенсивность движения по Эресуннскому мосту активно возрастала в течение первых шести лет эксплуатации, а затем установилась на стабильно высоком уровне в 18-19 тысяч машин в день. Количество железнодорожных пассажирских перевозок также активно росло год от года и за 14 лет эксплуатации изменилось с 2,2 млн. пассажиров в год, до 11,9 млн. пассажиров в год. Также изменился объем грузовых перевозок – с 1,5 млн. тонн в 2000 году до 6,1 млн. тонн в 2014 году [1].

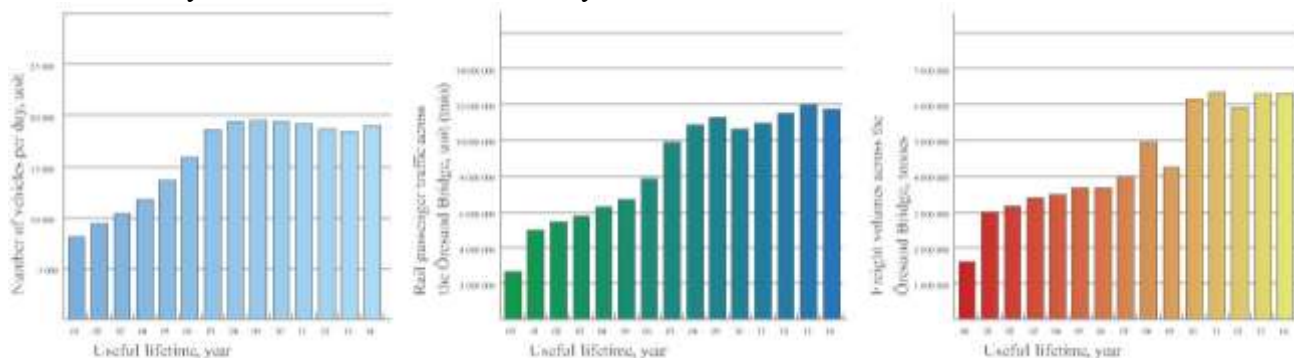


Рис. 1-3 Динамика роста транспортных потоков по Эресуннскому мосту

Таким образом, несмотря на высокую стоимость строительства, сооружение транспортного перехода между островом Сахалин и материковой частью Российской Федерации позволит в будущем дать мощный толчок развитию дальневосточной части страны и способствовать существенному росту как грузовых, так в перспективе и пассажирских перевозок.

Для определения возможных источников финансирования создания транспортного перехода через пролив Невельского целесообразно проанализировать мировой опыт. В настоящее время в мире есть ряд построенных и проектируемых транспортных переходов направленных на развитие транспортных коридоров и формирования единого транспортного пространства и общемирового рынка.

К построенным транспортным переходам между государствами можно отнести уже упоминавшийся Эресуннский мост-тоннель между Данией и Швецией и один из самых известных в мире подводный тоннель под проливом Ла-Манш между Францией и Великобританией. Эти сооружения спустя многие десятилетия, продолжают вдохновлять инженеров и строителей на создание грандиозных по масштабу и замыслу суперсооружений, реализация которых может начаться в ближайшее время на мегастройках нашей планеты. [2, 3, 4].

В настоящее время рассматриваются многие крупные инвестиционные проекты по созданию транспортных связей между различными территориями, такие как строительство тоннеля под Гибралтарским проливом между Португалией и Марокко, тоннеля под Финским заливом между Эстонией и Финляндией, тоннеля под Беринговым проливом между Российской Федерацией и США и других. По оценкам экспертов каждый из этих проектов может дать огромный экономический эффект, но, в тоже время, стоимость сооружения таких проектов тоже весьма значительна. Строительство амбициозных суперпроектов отличают исключительно сложные инженерно-гидрометеорологические и геологические условия, глубины заложения фундаментов опор до 100 м, повышенные требования морского судоходства с привлечением специалистов смежных специальностей (навигация морских водных путей, судостроение, морская гидрология и метеорология). Инженерные проекты будущих уникальных транспортных переходов значительной протяженности через морские проливы подробно рассмотрены в диссертационной работе Martire, Giulio (2010) *The Development of Submerged Floating Tunnels as an innovative solution for waterway crossings* [5], а также на симпозиумах и конференциях [6, 7, 8].

С 2000-х годов инженеры ведут поиск инновационного решения с использованием технологий углепластика для супердлинных мостов. Проект моста через Гибралтарский пролив со «сверхдлинным» пролетом в 10 км представлен на рис. 1 (инженер Марко Перони, Италия, 2005 г). Концепция трубы с круглым или эллиптическим поперечным сечением и сетчатым заполнением очень эффективна, аналогичные решения были запатентованы и в Великобритании - A tubular multiple cable bridge for long spans - патент GB2344370 - PARKHOUSE J. G. (с датой публикации патента - 06.07.2000), а также годом ранее и в С.- Петербурге – металлический вантовый мост - патент РФ 2133791 - Плехов Г.Г. (с датой публикации патента - 27.07.1999). Технический результат, обеспечиваемый изобретением, состоит в равномерном распределении напряжений в несущей части моста и повышении его жесткости.

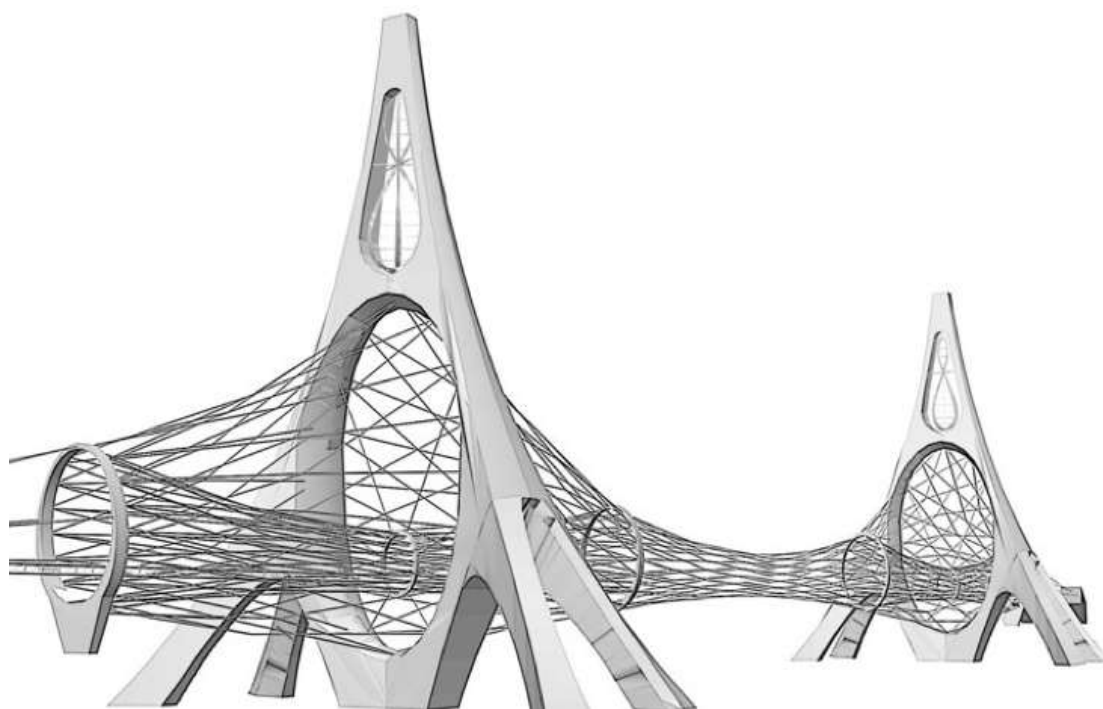


Рис. 1. Проект моста через Гибралтарский пролив (инженер Peroni, 2005 г).

При определении источников финансирования необходимо производить оценку возможных выгод от создания транспортного перехода и осуществлять поиск инвесторов, заинтересованных в улучшении транспортной инфраструктуры региона. В частности, остров Сахалин является одним из богатейших регионов минерально-сырьевого сектора экономики страны. На острове Сахалин добываются важнейшие энергетические ресурсы, а именно нефть, газ и уголь, но транспортная инфраструктура острова недостаточно развита. В соответствии с данными представленными на официальном сайте губернатора и правительства Сахалинской области транспортная инфраструктура имеет один из самых низких показателей удельного веса автомобильных дорог с твердым покрытием (41,6% от общей протяженности автомобильных дорог при 65,2% от протяженности автомобильных дорог в ДФО), отставая по этому показателю от среднего российского значения (85,2%).

Кроме этого существенные вложения требуются в железнодорожную инфраструктуру. Предусматриваются два основных варианта стратегии модернизации транспортной инфраструктуры Сахалинской области:

- 1) Совершенствование действующей схемы транспортного сообщения, предполагающее перешивку железнодорожного полотна с 1067 мм на современные 1520 мм.
- 2) Вариант развития транспортного комплекса – соединение Сахалина мостовым переходом (тоннелем) с материком через пролив Невельского.

Таким образом наиболее логичным шагом по реализации строительства транспортного перехода на остров Сахалин является использование как государственного финансирования, так и привлечение частных средств компаний, заинтересованных в развитии транспортной инфраструктуры Сахалина для своих проектов, т.е. государственно-частное партнерство (ГЧП).

Данный вариант финансирования широко применяется в мире при реализации крупных проектов. За последние годы развивающиеся страны ускорили темпы проведения реформ, направленных на улучшение условий для начала и осуществления предпринимательской деятельности, отмечает ежегодный исследование Группы Всемирного банка, измеряющее показатели благоприятности условий ведения бизнеса. Данные приведенные в табл. 1 показывают, что государственно-частные партнерства стали реальной заменой и альтернативой программы полной приватизации объектами транспортной инфраструктуры [9].

Таблица 1. Проекты с привлечением частных инвестиций в развивающихся странах за период 1990–2018 гг.

Инфраструктура	Количество проектов	Накопленные инвестиции (млн долл.)
Железные дороги	140	120 951
Автомобильные дороги	1024	298 730
Морские порты	457	86 870

Наиболее распространенной формой взаимодействия государства и бизнеса в сфере управления автомобильными дорогами является концессия. Необходимо отметить, что первые дорожные проекты в Дании и Швеции «Большой Бельт» и мост через пролив Орезун были одобрены обществом, так как они составили экономичную альтернативу паромам. Государственно-частное партнерство на транспорте в России традиционно наиболее активно развивается в сфере строительства и эксплуатации дорог. Первыми проектами ГЧП в России стали строительство Западного скоростного диаметра (ЗСД) в Санкт-Петербурге и участка скоростной трассы Москва — Санкт-Петербург (СПАД), строительство обхода г. Уфа и т.д.

ГЧП-проекты в дорожной отрасли РФ осуществляются сравнительно недавно, фактически ситуация изменилась в 1992 г. с введением в действие указа Президента РФ от 8 декабря 1992 г. N 1557 "О строительстве и эксплуатации автомобильных дорог на коммерческой основе", но несмотря на все трудности в условиях кризиса мировой финансовой системы, авторы выражают надежду, что будущий проект станет знаковым для транспортной инфраструктуры для последующих десятилетий в условиях формирования трансконтинентальных коридоров, с привлечением для долгосрочных и капиталоемких мегаинфраструктурных проектов японских, китайских, корейских и иных зарубежных капиталов заинтересованных сторон из стран-участников.

2 Основные сложности, влияющие на выбор варианта транспортного перехода

2.1 Геологические условия

Переход через пролив Невельского будет располагаться в весьма сложной с геологической точки зрения пограничной зоне между двумя крупнейшими геологическими структурами: Евразийской плитой на западе и Тихоокеанской на востоке. Граница между структурами в районе перехода имеет меридиональное направление.

Пролив Невельского ограничен с запада широтно вытянутым полуостровом, врезающимся в Татарский пролив и имеющим примерно десятикилометровую извилистую береговую линию с общим направлением с севера на юг. Участок берега, примыкающий собственно к проливу

Невельского, ограничен с севера мысом Лазарева, а с юга – мысом Муравьева. Наименьшая ширина пролива (между мысом Средним на западе и Погиби – на острове Сахалин) 7,8 км.

Рельеф полуострова, ограничивающего с запада пролив Невельского, низкогорный (максимальная абс. отм. 272 м) с крутыми, иногда обрывистыми склонами, восточная оконечность полуострова сложена верхнемеловыми вулканическими породами, смятыми в меридионально вытянутую складку. Геологические породы представлены туфоконгломератами мощностью до 100 – 150 м и лавами андезитов и базальтов мощностью до 500 – 650 м. Андезито-базальты образуют в рельефе на материковом берегу структурное плато. К востоку кровля вулканических пород резко опускается под дно пролива и на побережье о. Сахалин залегает на глубинах в несколько сотен метров.

Согласно «Карт новейшей тектоники острова Сахалин» (В.В.Соловьев 1969 г.) рассматриваемый участок побережья Сахалин находится в зоне опускания земной коры, амплитуда этих опусканий составила за четвертичное время 200 м.

2.2 Сейсмотектонические условия района

Территория Приморья в целом, и рассматриваемый район в частности, в сейсмотектоническом отношении изучены недостаточно. Это объясняется редкой сетью сейсмических станций, сравнительно небольшим периодом инструментальных наблюдений за сейсмичностью, сложностью структурно-тектонических условий краевой части материка.

Оценочное значение магнитуды землетрясений по карте сейсмического районирования составляет 7-8 баллов. Кроме того, есть основания предполагать, что пролив Невельского находится в зоне активных разломов земной коры и, следовательно, необходимо учитывать фактор влияния на конструкцию перемещения грунтовых масс.

Следует отметить, что на возможность возникновения сильных землетрясений 8-11 баллов в Приморье указывали 20 лет назад исследования сейсмологов Института земной коры СО АН СССР и ученых Дальневосточного научного центра.

2.3 Климатические условия района

Климат района – муссонный, средняя температура января минус 15°С, августа -плюс 14-16°С. Абсолютная минимальная температура - минус 47°С Продолжительность теплого периода около 3 месяцев. Годовое количество осадков летом – 350 мм, зимой – 190 мм. В конце лета наблюдаются циклоны и сильные ливни. Максимальное количество осадков от дождя за сутки – 80 мм.

Уровень воды в заливе испытывает колебания под воздействием на водную среду приливно-образующих сил, а также в результате изменения гидрометеорологических факторов. Приливно-отливные колебания уровня моря у побережья составляют +1,0 м от уровня океана.

Пролив Невельского покрыт льдом с конца декабря по март. Толщина льда доходит до 0,8-1,0 м. Зимние северные ветры вызывают сжатие и торошение льда.

Зимой температура воды минус 1,0 – 1,8 С, воды опреснены стоком реки Амур.

Перенос воды в проливе зимой – с севера на юг, летом – с юга на север, скорость приливно-отливных течений у берегов до 4 м/с, в центре – до 1 – 2 м/с.

Резюмируя, выделим основные особенности проектирования транспортного перехода через пролив Невельского:

- 1) Высокая сейсмическая активность района строительства.

2) Геологические условия возможного участка транспортного перехода для материковой и островной частей резко отличаются. На материке преобладают магматические горные породы, на острове – осадочные, уходящие в проливе на глубину десятков метров.

Разное геологическое строение материковой и островной частей пролива предполагает наличие тектонического разлома (не исключено, даже нескольких). Это несет большую вероятность сдвиговых явлений по разломам, что должно быть учтено при разработке проектов транспортного перехода.

3) Расположение мостового перехода по давлению ветра, по меньшей мере, в V районе - согласно СП 131.13330.2012 «Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99* (с изменениями №1, 2).

4) Природно-климатические факторы, особенно в зимний период, весьма суровые: штормовые ветра, метели, интенсивные снегопады, обледенение конструкций, ледовые явления.

Ближайшие к мостовому переходу населенные пункты имеют следующие показатели: абсолютная минимальная температура - минус 47°C, средняя по месяцам температура наиболее холодных суток обеспеченностью 0,98 - минус 34...41°C; абсолютная максимальная температура - плюс 31...35°C.

5) Глубины воды в проливе в створе перехода имеют значение 21...23 м.

6) Гидрологическая обстановка характеризуется сменой направления течения в проливе, высокой его скоростью, приливами, отливами, значительными аллювиальными отложениями и их размывами.

7) Отмечается наличие в проливе в холодное время года сплошного ледяного покрова.

Аномальные морозы и сильные ветры (на дату 11.02.19 - штормовое предупреждение, минус 43,7 градусов, до 35 м /с), прохождения циклона над Татарским проливом, обильные снегопады, горная местность, опасность схода лавин, обледенение конструкций) и частые метели — эти особенности северного климата, с которой столкнуться проектировщики, строители и эксплуатирующие службы по данным Главного управления МЧС России по Сахалинской области. Указанные неблагоприятные суровые и холодные погодные условия усложняют выполнение многих видов строительно-монтажных работ, увеличивают опасность на строительных площадках, ограничивают или полностью исключают работу подъемных кранов, подвергают опасности разрушений сооружения, затрудняют передвижение ремонтновосстановительных бригад, увеличивают расход электроэнергии. Уникальный проект необходимо реализовать с участием частных инвесторов, которые заинтересованы в поддержке и вложением средств на применение инновационных технологий и развитие программ энергоэффективности и возобновляемой энергетики. Меры по энергоэффективности окупятся в холодном и удаленном районе Сахалина намного быстрее, чем в Европейской части РФ, до 4-5 раз по данным Центра по эффективному использованию энергии (англ.: CENEf (CENEF), Center for energy efficiency, <http://www.cenef.ru/>). Приведенные ЦЭНЭФ оценки и идеи необходимо учитывать в начальной стадии проекта для обеспечения бесперебойного и доступного использования энергии на протяжении всего жизненного цикла транспортного перехода.

Часть 2 Возможные варианты конструктивно-технологических решений транспортного перехода между островом Сахалин и материковой частью Российской Федерации

При разработке проектов транспортного перехода между островом Сахалин и материковой частью Российской Федерации рассматриваются три основных варианта конструктивно-технологических решений – мостовой переход, тоннель, сооружаемый способом опускных секций, и тоннель, сооружаемый щитовым способом.

Каждый из этих вариантов имеет свои достоинства и недостатки.

Вариант 1. Мостовой переход

Практика мирового мостостроения уже имеет успешные примеры проектирования и строительства автодорожных и совмещенных мостовых переходов в сложнейших условиях высокой сейсмичности и сложной тектоники, при наличии мощной толщи слабых грунтов в основании и высокоинтенсивных ветровых воздействий. К таким примерам можно отнести совмещенный Эресуннский мост-тоннель, мост на остров Русский (Россия), совмещенный мостовой переход между Таманским полуостровом и Крымским полуостровом, мостовой переход через пролив Босфор (Турция) и др. Эти примеры показывают возможности реализации идеи создания мостового перехода через пролив Невельского.

Вместе с тем, приведенные в разделе 2 факторы, такие как мощные ветровые нагрузки, низкие температуры, сложная морская обстановка и высокая ледовая нагрузка, существенно осложняют производство работ и удорожают стоимость строительства, а впоследствии и содержания мостового перехода.

В 2013 году институтом «Гипростроймост» выполнены предварительные проектные эскизы однопутного железнодорожного моста. Предложения ориентированы на конструкции решетчатых ферм.

В первом варианте принята схема с использованием двух неразрезных пролетных строений (2х330 м); девяти неразрезных пролетных строений (2х220 м); двух ферм длиной 220 м; одного однопролетного строения длиной 110 м и двух балочных пролетных строений по 33,6 м. Полная длина моста составляет 5948,04 м. Число промежуточных опор – 26.

Во втором варианте: два неразрезных пролетных строения (2х330 м); шесть неразрезных пролетных строений (2х220 м); 17 однопролетных ферм длиной 110 м и два балочных пролетных строения по 33,6 м. Полная длина моста – 5960,04 м. Число промежуточных опор – 34.

Оба варианта в таком исполнении не решают всех проблем надежного сообщения на многие годы между материком и островом. Здесь должны быть приняты конструкции транспортных коммуникаций, обеспечивающие двухпутный пропуск железнодорожного подвижного состава, а также необходимых автомобильных потоков.

Конструктивные решения пролетных строений вариантов не пригодны для устройства второго яруса под автомобильное движение, а внутренние габариты не могут обеспечить двухпутное железнодорожное сообщение.

Большое число промежуточных опор (от 26 до 34) вызовет сложные эрозионные процессы в русле, а то как они скажутся в дальнейшем на аллювиальных отложениях в проливе – непредсказуемо.

Оба варианта не отвечают внешним природно-климатическим факторам. Во-первых, неизбежно сильное льдонамерзание на многочисленных элементах решетчатых пролетных строений в зимний период. Во-вторых, значительная сейсмическая активность региона при возможных землетрясениях и сдвиге тектонических плит материковой и островной частей может повлиять на срок службы искусственного сооружения.

Решение обозначенных проблем может быть достигнуто за счет других проектных схем, в том числе уже известных в мировой практике. Сейсмические воздействия и возможные тектонические смещения в зоне транспортного перехода как угрозу возможно устранить висячими или гибридными кабельно-вантовыми системами. Такие системы остаются эффективными для пропуска железнодорожной нагрузки при пролетах в тысячу и более метров.

В мировой практике мостостроения запроектированы, построены и строятся десятки большепролетных мостов с центральными пролетами от 1000 до 2000 м и более. Ряд из них обеспечивает пропуск совмещенного (автодорожного и железнодорожного) движения. В настоящий момент через пролив Босфор построен третий гибридный кабельно-вантовый мост с центральным пролетом 1408 м, который предусматривает двухпутное железнодорожное сообщение и четыре полосы автодорожного движения в каждом направлении.

Проблемы обледенения конструкций можно решить путем укладки греющих кабелей вдоль основных несущих элементов. В балках жесткости проектируются закрытые полости, продуваемые при необходимости теплым воздухом.

Проектирование железнодорожного мостового перехода через пролив Невельского - уникальная научно-техническая задача не только для отечественного, но и для мирового мостостроения в силу необходимости одновременного комплексного рассмотрения наибольшего числа природных факторов.

Создание железнодорожного мостового перехода через пролив Невельского потребует, по-видимому, разработки специальных технических условий проектирования и строительства в дополнение к действующим нормам, а также выдвижения и применения ряда принципиальных положений для направленного поиска и принятия надежных и эффективных инженерных решений, что особенно важно на стартовом этапе осуществления проекта.

В данной статье авторами предлагается рассмотреть расчетную схему и 3D визуализацию висячего совмещенного мостового перехода через пролив Невельского с центральным пролетом 700 м (см. Рисунок 1 и 2.). С целью оптимизации работы промежуточной конструкции пилона была выполнена оценка напряженно-деформированного состояния в программном комплексе SOFiSTiK путем сравнения основных статических схем. Конечно-элементная модель балки жесткости и пилон представлена стержневыми балочными элементами, несущий кабель и подвески - элементами, работающими только на растяжение. Балка жесткости имеет шарнирно-подвижные точки опирания на концах и на перемычке пилон вдоль оси моста. У основания пилон закреплен жестко.



Рис. 1. Расчетная схема висячего моста.

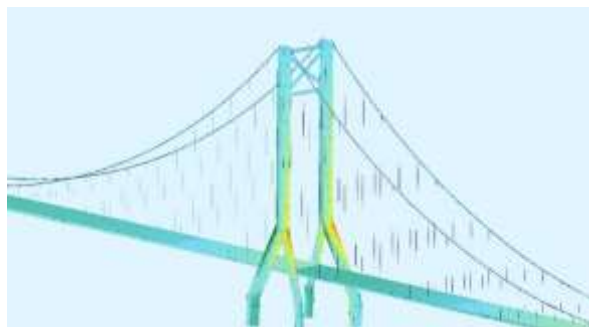


Рис. 2. 3D визуализация совмещенного двухъярусного моста.

Особенностью многопролетных висячих мостов можно отнести пониженную вертикальную жесткость в случае несимметричного нагружения одного из пролетов, причем при увеличении числа пролетов общая жесткость системы продолжает снижаться. Применение многопролетных висячих мостов без принятия специальных мер повышающих их жесткость практически невозможно. В качестве такой меры может быть применено устройство жестких пилонов. Рассмотрим несколько конструктивных решений пилонов и влияние формы пилона на общую работу сооружения.



1



2



Рис. 3. Напряжённо-деформированное состояние основных вариантов пилона: жесткие (1 и 2) и гибкие (3) пилоны.

В качестве расчета был принят двухъярусный висячий мост, представленный на рисунке 2. Балка жесткости коробчатое поперечное сечение с ортотропной плитой проезжей части. Материал балки сталь с модулем упругости $E = 200000$ МПа и объемным весом $\rho = 78.5$ кН/м³. Главный несущий кабель $d = 0.7$ м из стали $E = 200000$ МПа и объемным весом $\rho = 78.5$ кН/м³. Подвески $d = 0.15$ м из стали $E = 200000$ МПа и объемным весом $\rho = 78.5$ кН/м³. Рамный пилон по схеме 1: у основания габарит 6 x 6 м, толщина стенок 0.7 м, на вершине 4,5 x 4,5 м, толщина - 0.5 м. Материал пилона – железобетон с модулем упругости $E = 27500$ МПа и объемным весом $\rho = 25.0$ кН/м³. Рамный пилон по схеме 2: у основания (наклонные стойки) габарит 4,5 x 4,5 м, толщина стенок 0.5 м., на вершине 5 x 5 м, толщина - 0.5 м. Материал пилона – железобетон с модулем упругости $E = 27500$ МПа и объемным весом $\rho = 25.0$ кН/м³. Гибкий пилон по схеме 3: габарит сечения 5 x 5 м, толщина стенок 0.5 м. Материал пилона – железобетон с модулем упругости $E = 27500$ МПа и объемным весом $\rho = 25.0$ кН/м³.

Жесткий А-образный пилон в полной мере удовлетворяет требованиям жесткости и прочности, но за счет своей малой податливости пилон передает на фундамент значительные усилия, что в результате в значительной степени усложняет конструкцию фундамента опоры. Кроме того, строительство пилона с такой сложной геометрической формой связано с большими трудностями. Увеличение гибкости пилона в направлении вдоль моста смогло бы разгрузить её. Таким образом переходим к рассмотрению пилона Y-образной формы (схема 2), которая обладает достаточной гибкостью, но при этом сохраняет возможность воспринимать горизонтальные усилия от главного несущего кабеля.

Из результатов расчетов становится ясным, что традиционная форма пилона (схема 3) не может быть применена в многопролетном висячем мосту без применения дополнительных мер по увеличению вертикальной жесткости. В то же время, конструкция такого пилона наиболее проста в отличии от других схем.

К дальнейшей разработке рекомендован вариант пилона №1 – по результатам оценок эпюры изгибающих моментов и перемещений.

Вариант 2. Тоннель, сооружаемый способом опускных секций.

Первый тоннельный переход из опускных секций в Европе сооружался с 1937 по 1942 год вблизи Роттердама (Нидерланды). В настоящее время эта технология в мировом тоннелестроении распространена довольно широко.

Большое количество построенных и эксплуатируемых в мире транспортных переходов, включающих тоннели из опускных секций, свидетельствует о эффективности такого метода строительства [8].

К реализованным примерам строительства транспортных переходов способом опускных секций можно отнести сооружение тоннельного участка Эресуннского моста-тоннеля длиной 4050 м, сооружение автодорожного транспортного тоннеля Пусан-Кодже (Южная Корея) длиной 3200 м, и подрусового участка тоннеля Мармарай под проливом Босфор (Турция) длиной 1400 м и тоннельный участок транспортного перехода между Гонконгом и Макао (Китай) длиной 4200 м.

Однако в России имеется лишь небольшой опыт сооружения тоннелей таким способом. В 80-е годы прошлого столетия способом опускных секций был построен тоннель в Санкт-Петербурге на Канонерский остров. Он состоит из шести секций длиной по 110 м, сечением 13,2 x 7,9 м.[7].

Строительство способом опускных секций обладает рядом преимуществ, таких как:

1. Одновременное производство большого количества секций тоннеля на берегу и совмещение по времени этапов строительства (сооружение секций, подготовка траншеи, транспортировка секций) позволяют существенно ускорить темпы работ, используя при этом технологические достижения, свойственные современному производству железобетонных изделий.

2. Сечение тоннеля из опускных секций не должно быть обязательно цилиндрическим (как это требуется при щитовой проходке), есть возможность сооружать тоннели с различными формами поперечных сечений.

3. Тоннели из опускных секций допустимо строить при любых типах грунтов, включая и мягкие аллювиальные, так как давление секций на грунт вследствие большой площади опирания незначительно отличается от давления замещённого тоннелем грунта в естественных условиях.

4. Тоннельный переход из опускных секций, как правило, короче перехода, сооруженного при помощи ТПМК.

Вместе с тем, при сооружении тоннеля таким способом потребуется решить целый ряд вопросов.

1. Во-первых, необходимо исключить деструктивное влияние сооружаемого объекта на гидрологические явления в проливе (размывы аллювиальных отложений, изменение скоростей разнонаправленных течений), что достигается за счет заглубления тоннелей и последующей засыпки грунта до отметки, соответствующей первоначальному уровню дна пролива. Возможно также придание секциям внешней обтекаемой эллипсоидной формы.

2. Во-вторых, воздействие сдвигов в зоне разломов может привести к нарушению гидроизоляции тоннеля. Воздействие сдвигов можно уменьшить, используя специальные прокладки между секциями, обеспечивающие герметичность, относительные смещения и повороты торцов секций тоннелей без повреждения, либо предусматривая пересечения разломов в односекционном исполнении с предварительным обжатием напрягаемой арматурой (защищенной от коррозии).

3. В мировой практике нет опыта строительства тоннелей из опускных секций длиной более 4200 м, тогда как создание транспортного перехода под проливом Невельского потребует сооружение тоннеля из опускных секций общей длиной не менее 8000 м.

4. Достаточно сложной задачей представляется транспортировка секций в условиях значительных течений в проливе и сложной волновой обстановки.

Вариант 3. Тоннель, сооружаемый щитовым способом.

Сооружение транспортных тоннелей большой протяженности при помощи тоннелепроходческих механизированных комплексов в настоящее время достаточно распространенная задача. В

качестве примера реализованных проектов такого строительства можно назвать тоннель Большой Бельт (Дания) и тоннель под проливом Ла-Манш между Францией и Великобританией, служащий эталоном для сооружений подобного рода.

Типовым решением всех проектируемых в настоящее время транспортных переходов с применением щитовой проходки является строительство трех тоннелей: двух транспортных однопутных железнодорожных и сервисного тоннеля малого диаметра между ними.

Для упрощения системы вентиляции, а также минимизации диаметров тоннелей целесообразно организовать перевозку автотранспорта по железной дороге на специальных платформах.

Возможное конструктивное решение тоннеля представлено на Рисунке 2.

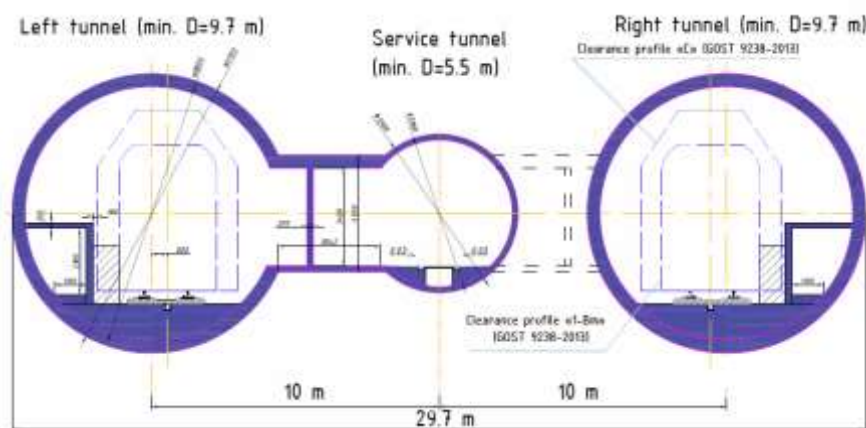


Рис. 2. Возможное конструктивное решение тоннеля на остров Сахалин.

Вариант сооружения тоннеля способом щитовой проходки имеет следующие преимущества.

1. Технология щитовой проходки многократно апробирована. Отечественные тоннелестроительные организации имеют немалый опыт проектирования и строительства тоннелей, в том числе в сложных инженерно-геологических условиях [7].

2. При строительстве тоннелей щитовым способом, с применением современных тоннелепроходческих механизированных комплексов на основе щитов с активным пригрузом забоя, сооружение тоннеля не оказывает существенного влияния на окружающую природную среду и практически не зависит от природно-климатических условий.

3. Тоннель залегает на большей глубине по сравнению с тоннелем из опускных секций и в меньшей степени подвержен сейсмическим воздействиям чем тоннель из опускных секций или мост.

Следует отметить, что сейсмические воздействия составляют значительную долю нагрузок при расчете обделок тоннелей, что должно быть учтено при проектировании. В соответствии с предварительными расчетами наиболее опасным является сочетание основных нагрузок (нагрузки от горного давления, гидростатики, собственного веса обделки) и вертикальных сейсмических нагрузок (см. Рисунок 3). По результатам расчетов наибольшие значения изгибающих моментов достигаются при совпадении направления нагрузок от веса воды и грунтов над тоннелем, собственного веса обделки и вертикальных сейсмических нагрузок. При толщине обделки 450 мм и классе бетона В60 максимальные значения изгибающих моментов составили 143,9 тм, что не является пределом для существующих обделок.

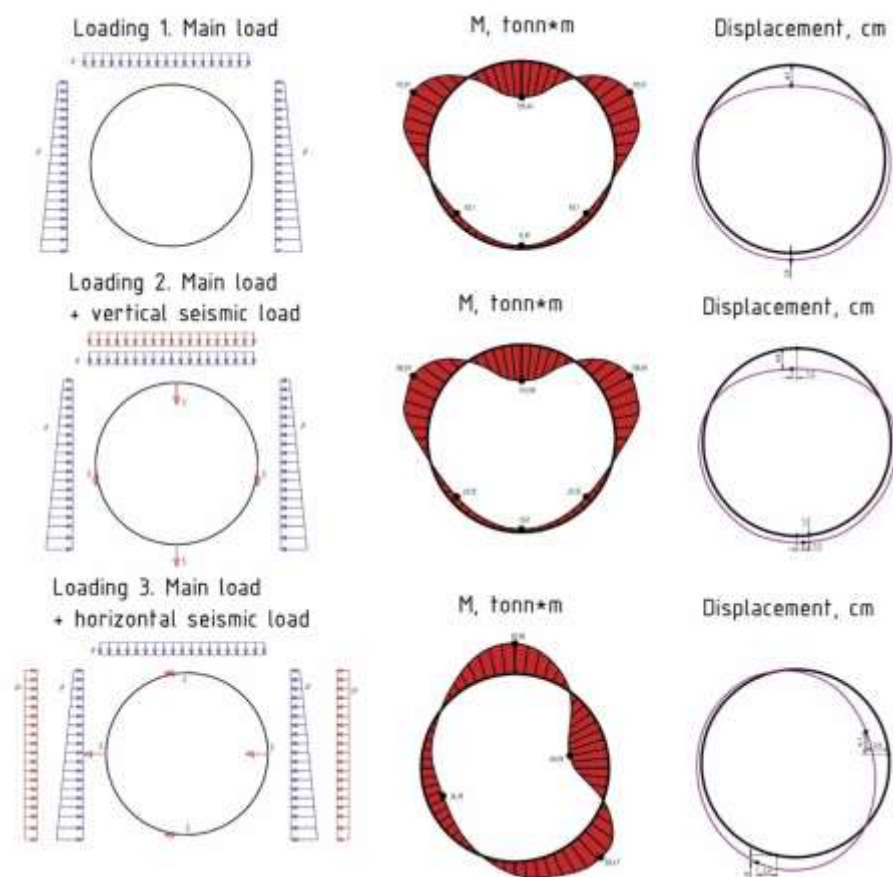


Рис. 3. Эпюры изгибающих моментов и перемещений в обделке тоннеля на подрусловом участке при различных вариантах нагружения.

4. Важным вопросом является проблема обеспечения долговечности обделки тоннеля, находящейся под воздействием морской воды, а также обеспечение герметичности обделки.

В качестве одного из вариантов повышения сопротивляемости коррозионному воздействию морской воды выступать применение специальных сортов бетона с добавками повышающими однородность бетонной смеси и как следствие повышающих водонепроницаемость и коррозионную стойкость. В частности может быть использована технология примененная при сооружении Эресуннского тоннеля, а именно добавление использования попутных продуктов промышленности и утилизации зол-уноса.

Применение золы-уноса в составе высокопрочной бетонной смеси для изготовления тяжелого бетона искусственных сооружений через пролив Эресунн позволило кроме утилизации отходов производства получить более плотную структуру бетона, сократить расход цемента и увеличить его прочностные характеристики, а также улучшить технологические свойства бетонной смеси. Повышение водонепроницаемости обделки и стыков блоков также может быть достигнуто устройством сплошной гидроизоляции по внутренней поверхности сборной обделки и устройством внутреннего слоя обделки из монолитного железобетона [10].

5. Важной проблемой при сооружении тоннеля с применением ТПК на подрусловом участке пролива Невельского является обеспечение безопасности строительства. Несмотря на известные случаи нарушения герметичности строящегося тоннеля (например, при строительстве тоннеля Большой Бельт в Дании) щитовая проходка, при соблюдении технологии производства работ и правильном учете инженерно-геологических условий на участке строительства, является достаточно безопасным способом сооружения тоннеля.

Часть 3. Анализ стоимости строительства мостовых и тоннельных транспортных переходов

К числу недостатков тоннельных вариантов по сравнению с мостовыми часто относят их повышенную строительную стоимость. Однако осуществленные за рубежом в последние годы сооружения и выполненные проектные разработки фирм COWI & Partners LLC, Consulting Engineers & Planners показывают, что в современных условиях при использовании прогрессивных конструкций и методов производства работ различие в стоимости протяженных уникальных сооружений обычно не выходит за пределы 15% (например, для Эресуннского моста и тоннеля - 13,8 % - см. данные в табл. 1).

Таблица 1. Техничко-экономические показатели сооружения Эресуннского моста и тоннеля

Основные показатели Эресуннского моста и тоннеля	Стоимость сооружения, млрд \$ в уровне цен 2017г.	Стоимость на 1 м сооружения, млн \$ в уровне цен 2017г.
Мост двухрусный длиной 7845 м, шириной - 2x15,5+15м – 34% от стоимости всего сооружения	3,645	0,465
Тоннель длиной 4050 м, шириной 45 м – 20% от стоимости всего сооружения	2,144	0,529

На рис. 1 представлена графическая зависимость стоимости транспортных переходов от протяженности искусственных сооружений (тоннель или мост). При определенной протяженности перехода значения стоимости моста и тоннеля становятся равными, а при дальнейшем увеличении протяженности сооружение тоннеля становится экономичнее, чем мостовое сооружение.

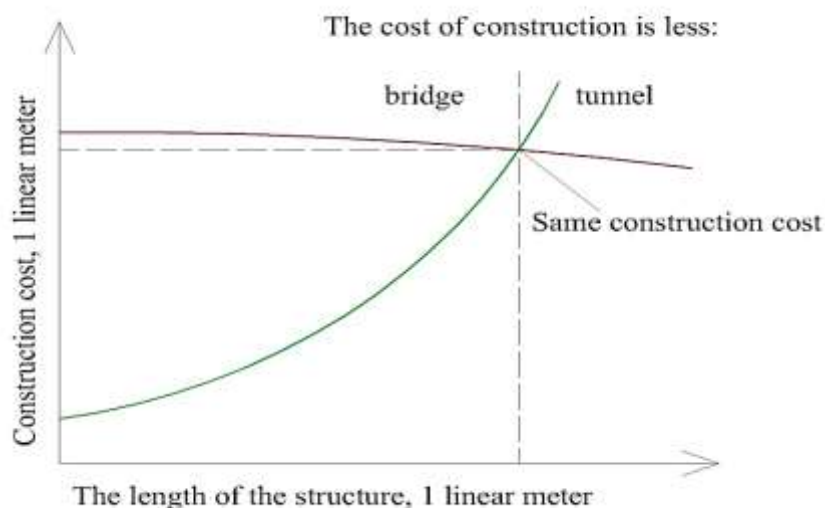


Рис. 1. Графическая зависимость стоимости транспортных переходов от протяженности и основного типа искусственных сооружений (тоннель или мост).

Вместе с тем, при дальнейшей эксплуатации, особенно в условиях сурового климата эксплуатации тоннельного варианта оказывается более экономичной по данным ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс» в условиях Дальнего Востока России (железнодорожный тоннель под Амуром

протяжённостью 7198 м в Хабаровске был построен в 1937-1941 годах для дублирования моста через Амур) [10].

Рассмотрим метод аналога, как наиболее эффективный инструмент получения объективной оценки будущего транспортного проекта. Предварительно, рассматривая аналоги, стоимость Сахалинского моста длиной 6000 м равна – $C=0,465 \times 6000 \times 66 / 1000 \times 1,15 = 211,5912$ млрд. рублей в уровне цен 2017г., принимая 0,465 – стоимость на 1 м мостового сооружения, млн \$ в уровне цен 2017г. см. в таблице 2; курс доллара США в 2017 г - 66 руб.; с последующим применением индекса пересчета сметной стоимости строительно-монтажных работ (СМР) для Сахалинской области равного 1,15, см. п. ИССО - прил. 1 Отраслевые укрупненные сметные нормативы ОНЦКРЖ 81-02-07-2017 «Железные дороги».

Годовые затраты на обслуживание будут составлять 0,5% в течение первых 10 лет, а затем 1% в течение следующих 10 лет и 1,5% до 2030 года, что составит 30 % от стоимости моста в первые 30 лет эксплуатации моста.

В соответствии с существующими отечественными и зарубежными стандартами, долговечность таких инженерных сооружений, как мост или тоннель, должна составлять не менее 100 лет (по европейским нормам – не менее 120 лет, рекомендуемый пример – Эресуннский совмещённый мост-тоннель). Принимая расчетный срок службы 120 лет, по предварительному расчету (см. данные в таблице 2), показатель экономии эксплуатационных расходов составит на 25 % меньше, в сравнении с мостовым сооружением с металлическими пролетными строениями с учетом всего срока эксплуатации (жизненного цикла сооружений).

Таблица 2. Сравнение показателей конструкций мостов и тоннелей

Показатели	Мостовые конструкции (пролетные строения) с применением железобетона и металла	Тоннельные конструкции (железобетонных блоков тоннельной обделки)
Нормативный срок службы сооружения	50-100 лет СП 35.13330.2011 Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84* (с Изменением N 1)	Свыше 100 лет СП 122.13330.2012 Тоннели железнодорожные и автомобильные. Актуализированная редакция СНиП 32-04-97 (с Изменением N 1)
Стоимость строительства, включая материалы (зарубежные и отечественные аналоги)	100%	115%
Содержание и ремонт в течение первых 50 лет эксплуатации (реальные расходы за 2016 г)	50 % от первоначальной стоимости, длины и материала пролетного строения и пилона	30 % от первоначальной стоимости
Финальная стоимость с учетом эксплуатационных затрат в 100 летний период	150 %	145%
Оценка экономической эффективности в зависимости от жизненного цикла, от 100 до 120 лет		25%

Структура затрат на строительство транспортных переходов показана на рисунке 2. Представлены технико-экономические показатели для двухъярусных вантовых и висячих мостов с жесткой стальной фермой и тоннеля на примере зарубежных стран: Китая, Японии и Швеции (указаны названия, основные параметры и год окончания строительства сооружений – 1998 г., 2000 г. и 2009 г.).

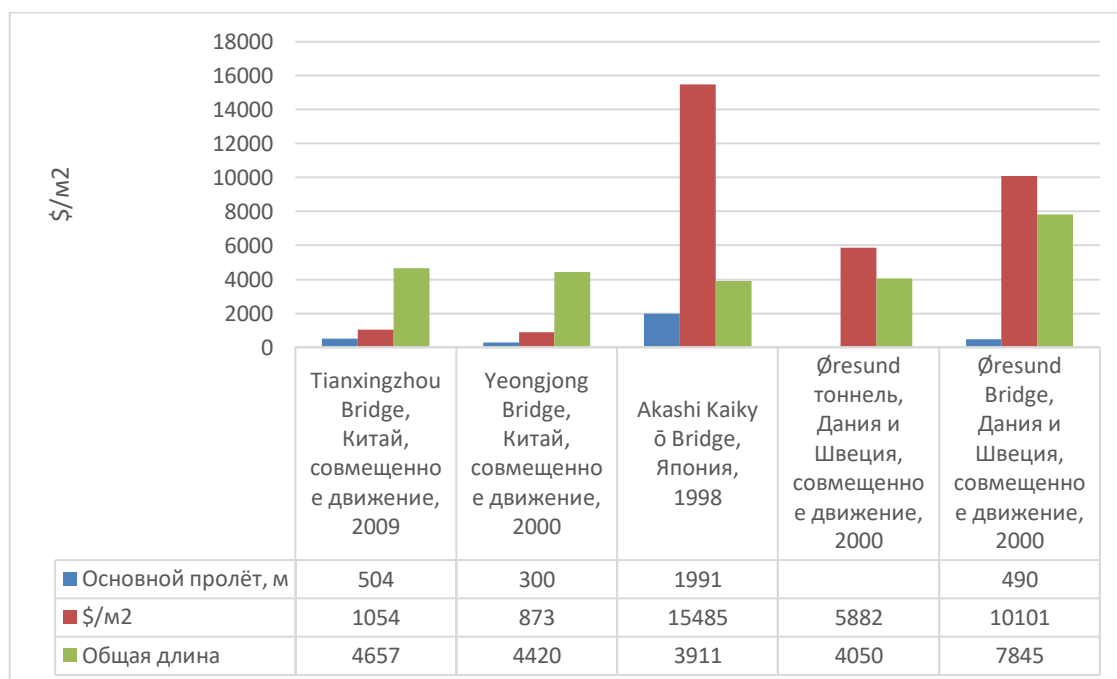


Рис. 2. Основные технико-экономические показатели двухъярусных вантовых и висячих мостов с жесткой стальной фермой и тоннеля.

Опыт Китайской Народной Республики по строительству объектов транспортной инфраструктуры за два последних десятилетия не знает себе равных в мировой истории, как и стоимость построенных в Китае совмещенных мостов, например, Tianxingzhou Bridge (рис. 3) - 1054 \$/м², финансирование строительства которого происходило за счет средств Министерства железнодорожного транспорта Китая и городского бюджета.

Стоимость строительства уникальных вантовых мостов в Российской Федерации не выше среднего уровня, наблюдаемого в большинстве зарубежных стран, но достичь технико-экономических показателей с существенным удешевлением строительства мостов как в Китае не представляется возможным. Общая стоимость реализации проекта по принятому аналогу - Эресуннский совмещенный мост-тоннель составит не более 10101 \$/м². При выборе проекта строительства конструкции висячего моста – это будет первый опыт для России по реализации мостов с данной расчетной схемой, но суровые холодные условия накладывают существенные ограничения по строительству и эксплуатации мостового перехода в удаленном регионе.

В настоящий момент стоимость подрядных работ по государственным контрактам для центральных искусственных сооружений кольцевых дорог двух столиц РФ составляет от 1 до 3 тыс.\$ за 1 м² в зависимости условий пересечения, конструкции и материала пролетного строения, способа монтажа с привязкой и технологическими окнами в графике движения поездов железных дорог ОАО "РЖД".



Рис. 3. Мост Тяньсинчжоу (кит. 武汉天兴洲长江大桥) — второй по длине основного пролёта 504 м автомобильно-железнодорожный мост вантовой конструкции в мире.

В отличие от отечественной практики в европейских странах в структуру затрат на строительство не входят затраты на подготовку территории (выкуп земли, а также вынос, снос и перенос зданий, сооружений и инженерных коммуникаций). В отечественной практике данные затраты включены в сметной стоимости объектов и составляют от 10% (на незастроенной территории) до 45% (в густонаселенной местности или городских условиях) от общей стоимости объектов. В результате анализа по стоимости искусственных сооружений КАД, выполненного по заказу Комитета по благоустройству и дорожному хозяйству, было установлено, что стоимость строительства мостов в столичных городах не выше среднего уровня, наблюдаемого в большинстве стран Европы и Северной Америки (по 4 методикам пересчета с учетом инфляции в строительстве для каждой страны и подбором аналогов по основным технико-экономическим показателям проекта).

В заключении хотелось бы отметить, что аналитический обзор и сравнение аналогов крупных инвестиционных проектов по технико-экономическим показателям должен включать все положительные эффекты от развития межнациональной транспортной системы. Реализация мегапроектов приводит к возникновению общих экономических эффектов ввиду положительного влияния на занятость, производительность труда и темпы регионального развития, и это, на взгляд авторов один из способов преодоления кризиса. Наглядный пример - социально-экономический эффект от транспортного перехода Эресунн за 2010 г. Швеция сэкономила 175 миллионов евро на выплатах пособия по безработице, благодаря расширению возможностей трудоустройства для ранее незанятых граждан [11].

Выводы и рекомендации

1. Сложившаяся экономическая и политическая ситуация требует активизации работ по созданию постоянно действующего транспортного перехода между островом Сахалин и материковой частью Российской Федерации.

2. Реализацию амбициозного крупномасштабного проекта, способного в перспективе оказать положительное влияние на темпы социально-экономического роста Сахалина, для всей России и стран-участниц Восточного Азиатского партнёрства, рекомендуется формировать в новой институциональной среде, основанной на партнерских отношениях государства с частным бизнесом.

3. В настоящее время в России и за рубежом накоплен значительный успешный опыт проектирования и строительства вантовых (висячих) мостов и подводных тоннелей (как автомобильных, так и железнодорожных) в сложных инженерно-геологических условиях, создано уникальное специализированное оборудование, имеются подготовленные и обученные инженерно-технические и рабочие кадры для проведения уникальных работ.

4. Практически все зарубежные страны при пересечении крупных водных преград при сравнении мостовых и тоннельных вариантов отдают предпочтение различным видам тоннельных переходов и в отдельных случаях комбинированное решение (тоннель-мост).

5. Эффективность вариантов предопределено в использовании двух основных вариантов: тоннель и вантовый (висячий) мост; двух статических схем с учетом уникальности, III категории сложности, неоднородности структурно-тектонической условий транспортного перехода для материковой и островной частей. Выбор оптимального варианта необходимо проводить по технико-экономическим показателям суммарных, строительных и эксплуатационных затрат, включая срок окупаемости, затрат на чрезвычайные ситуации, сейсмической безопасности, охраны окружающей среды за расчетный период эксплуатации.

6. Сложные геологические, гидрологические и метеорологические условия требуют комплексного подхода к решению инженерных проектов с точной идентификацией и оценкой природных рисков, а также способы преобразования природных возобновляемых источников. Необходимо проанализировать экономические аспекты внедрения изолированной энергосистемы (использование гидро- ветроэнергетических ресурсов и геотермальных электростанций) с возобновляемой энергетикой для автономного электроснабжения транспортного перехода на весь срок эксплуатации.

7. Освоение инноваций, обеспечивающие снижение экономических строительных затрат, повышение долговечности и сроков службы конструктивных элементов тоннельного сооружения (с применением высокопрочного бетона), применения высокопрочной стали для мостового сооружения, с расчетным сроком службы 120 лет и с предварительной экономией эксплуатационных расходов на 25 %, в сравнении с мостовым сооружением с металлическими пролетными строениями и пилоном.

8. В связи с отсутствием ключевых документов, необходимо законодательное решение для реализации нормирования в транспортной области по следующим направлениям: разработка специальных технических условий, единого нормативного документа, регламентирующего одновременно вопросы контрактов жизненного цикла, срока гарантийного обслуживания, качества и полноты инженерно-геологических изысканий, расчета, проектирования, производства работ и эксплуатации транспортного перехода в сейсмически опасных зонах. Технологию BIM, включая мониторинг и интерпретацию полученных результатов необходимо использовать при взаимодействии всех заинтересованных сторон и участников: заказчика, эксплуатирующей организации, проектировщика, строителей и др. Затраты на проектно-изыскательские работы для сложных уникальных объектов необходимо увеличить в несколько раз по примерам западных аналогов.

Список литературы

1. <https://data.oresundsbron.com> URL: <https://data.oresundsbron.com/cms/download/The%20Oresund%20Bridge%20and%20its%20Region%202015.pdf> (дата обращения: 20.12.2018).

2. Kirkland, C.J. The proposed design of the English Channel Tunnel (1986) *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless*, 1 (3-4), pp. 271-282.
3. Molenaar, V.L. Immersed tube tunnelling offshore: Execution of immersed tube tunnelling projects under offshore conditions, based on studies for the euroroute fixed channel link proposal (1986) *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless*, 1 (3-4), pp. 289-296.
4. Uchida, Takashige Plan, technology and future prospects for the seikan tunnel. (1985) *Civil engineering in Japan*, 24, pp. 14-23.
5. Giulio Martire The development of submerged floating tunnels as an innovative solution for waterway crossings: diss. PhD Engineering - Italy, - 316 p.
6. Peroni, M. New design idea for a very long suspension bridge (2008) EASEC-11 - Eleventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction.
7. Hao, D., Qinxi, L., Shuping, J., Ke, L. Enlightenment to Floating Tunnel of Existing Typical Submerged Tunnel (2016) *Procedia Engineering*, 166, pp. 355-361.
8. Siviero, E., Ben Amara, A., Guarascio, M., Bella, G., Zucconi, M., da Fonseca, A.A., Slimi, K. TUNeIT – Towards a global World (2015) *Multi-Span Large Bridges - Proceedings of the International Conference on Multi-Span Large Bridges*, 2015, pp. 215-222.
9. <http://ppi.worldbank.org> URL: <http://ppi.worldbank.org/snapshots/sector/railways> (дата обращения: 21.12.2018).
10. Кулагин Н.И., Маслак В.А., Безродный К.П., Лебедев М.О. О транспортном переходе на остров Сахалин // *Подземные горизонты*. - 2018. - №№18. - С. 38-43.
11. <http://www.orestat.se> URL: <http://www.orestat.se/en/analys/commuting-across-oresund> (дата обращения: 22.12.2018).