



Суляев Александр Павлович родился в 1989 г. в Новосибирске. В 2011 г. окончил с отличием Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС) по специальности «Мосты и транспортные тоннели». В настоящее время является аспирантом кафедры «Мосты» СГУПС.

Круг научных интересов — разработка конструктивных решений транспортных систем на основе композиционных материалов.

E-mail: alexandr-sulyaev@mail.ru

УДК 624.21

А.Н. ЯШНОВ, А.П. СУЛЯЕВ

К ВОПРОСУ О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ СТРУННЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ

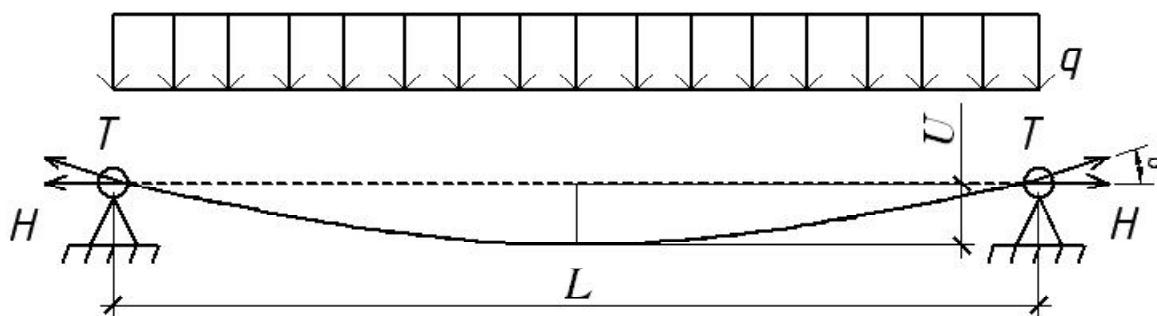
В статье рассмотрены вопросы возможности и целесообразности проектирования искусственных сооружений для струнного транспорта. Показано, что с технической точки зрения нет препятствий для создания струнных пролетных строений с пролетами до 100 м для одиночных пассажирских экипажей массой до 3 т. При этом в качестве основных несущих элементов (струн) могут быть использованы только композиционные материалы.

Ключевые слова: *струнный транспорт, композиционные материалы, гибкая нить.*

Идея создания струнного транспорта принадлежит российскому ученому и изобретателю А.Ю. Юницкому [1–3]. Впервые программа струнных транспортных систем была реализована при строительстве опытного участка транспортной системы в городе Озёры Московской области в 2001 г. Все проведенные исследования и их результаты, накопленный опыт и полученные данные в ходе экспериментов на опытном участке в г. Озёры легли в основу проектирования и разработки струнных транспортных систем нового поколения. По утверждению автора, главные преимущества струнной транспортной системы перед традиционными видами транспорта являются следствием новизны применяемых технологий и технических решений и проявляются в снижении материалоемкости при строительстве, повышении долговечности путевой структуры, снижении энергопотребления при эксплуатации.

Однако из имеющихся публикаций неясно как решаются вопросы обеспечения ровного (без переломов и провисаний) профиля верхней поверхности катания на струнном рельсе, устойчивости конструкции, восприятия температурных деформаций. Наконец, какие размеры поперечного сечения должны иметь основные несущие элементы, чтобы обеспечить перекрытие пролетов длиной до 100 м, например, под будущий перспективный пассажирский подвижной состав струнной транспортной системы.

Несущим элементом конструкции является струна, предварительно натянутая до усилий, составляющих 80 % от предела прочности материала высокопрочных проволок. С точки зрения строительной механики струна представляет собой гибкую нить (рисунок), работающую только на растяжение ввиду своей малой изгибной жесткости.



Расчетная схема гибкой нити

Придавая нити начальный прогиб (провисание) и загружая ее нагрузкой от собственного веса конструкции по пролету нити, можно записать формулу для определения величины натяжения в следующем виде:

$$T = \frac{qL^2}{8U \cos \alpha}, \quad (1)$$

где q — нагрузка от собственного веса конструкции; L — пролет нити; U — провисание нити.

Очевидно, что для того чтобы полностью убрать провисание нити и обеспечить абсолютно ровную поверхность катания, потребуется бесконечно большое усилие натяжения. Поэтому практический интерес представляет ограничение провисания нити до величины не более 10...15 см, что позволит построить несущую нить в коробчатый рельс высотой не более 30 см с горизонтальной верхней поверхностью. Заметим, что величина провисания в этом случае будет малой по сравнению с пролетом, и действительная кривая провисания нити не будет существенно отличаться от параболы, полученной в предположении равномерного распределения нагрузки по пролету нити, а не по ее длине, как то имеет место в действительности. Точные подсчеты показывают, что значение погрешности в величине натяжения таково: при отношении $(F/L) < (1/20)$ погрешность не превосходит 0,3 %.

Требуемая площадь поперечного сечения нити как центрально растянутого элемента может быть определена в соответствии с рекомендациями СП 35.13330.2011 [4] по формуле

$$A = \frac{T}{mR}, \quad (2)$$

где $m = 0,8$ — коэффициент условий работы для гибких несущих элементов; N — усилие натяжения нити; R — расчетное сопротивление материала нити.

Не вызывает никаких сомнений: чтобы получить компактное поперечное сечение, следует принимать материал, имеющий высокие прочностные показатели, — см. (2), при низком удельном весе — см. (1). Требуемыми свойствами обладают современные композиционные материалы, наиболее предпочтительным материалом будет высокоупругое углеволокно (в таблице приведены физико-механические характеристики углепластика в сравнении с высокопрочной сталью). Совершенно очевидно, что углеволокно по всем параметрам превосходит сталь, и именно углеволокно должно быть материалом для основных несущих конструкций струнного пролетного строения.

Сравнительные характеристики углеволокна и высокопрочной проволоки

Материал	Модуль упругости, ГПа	Предел прочности, МПа	Коэф. линейного температурного расширения, 1/град	Удельный вес, кгс/м ³
Углеволокно	390–760	2 400–3 400	$-1,45 \cdot 10^{-6}$	1 850–1 900
Высокопрочная проволока	177	1 100–1 490	$1,2 \cdot 10^{-5}$	7 850

Чтобы оценить эффективность струнных пролетных строений, была просчитана рельсострунная путевая структура протяженностью 1 км в привязке к условиям Новосибирска. Были проведены аналитический и численный расчеты, построена математическая модель с пролетами разной величины, которые показали теоретическую возможность создания подобной системы с использованием современных композиционных материалов.

Выше рассматривалось напряженно-деформированное состояние конструкции от собственного веса. Под воздействием одиночного экипажа временной нагрузки прогибы в середине пролета могут быть определены по формуле, полученной из уравнения колебания гибкой струны [1]:

$$U_{\max} = \frac{PL}{4T}, \quad (3)$$

где $U_{\max}$ — максимальный статический прогиб пролета конструкции; T — сила натяжения нити; P — одиночная нагрузка, приложенная в средней части пролета.

При выводе уравнения был принят ряд допущений:

- 1) жесткостью и массой корпуса конструкции (коробчатого рельса) пренебрегаем;
- 2) струны считаются связанными между собой невесомыми связями так, что расстояние между их точками, лежащими на одной вертикали, неизменны;
- 3) опоры представлены жесткими двухсторонними связями.

Выполненные по формуле (1) расчеты показали, что при длинах пролетов 10...100 м можно обеспечить прогибы струны в середине пролета менее 10 см, натягивая ее до усилий 100...1000 тс. Погонная масса путевой структуры при этом не должна превышать 500 кг/м, что вполне достижимо при использовании композиционных материалов в несущей конструкции. Максимальные прогибы струны под действием одиночной нагрузки массой до 3 т при принятых выше условиях не превысят 7 см, что при длине пролета 100 м лучше, чем показатели существующих пролетных строений.

Следует отметить, что с точки зрения работы конструкции при температурных воздействиях углеволокно, имеющее меньший коэффициент линейного температурного расширения, также предпочтительнее, чем стальная проволока. При использовании стальных струн в рельсе требуется постоянная регулировка усилий в напряженно-деформированном состоянии конструкции, так как температурные напряжения будут достигать 12 % от предела прочности материала струн на разрыв. Конструкция узлов закрепления струны и натяжные устройства должны обеспечивать возможность создания и восприятия усилий регулирования. Одним из перспективных вариантов регулирования усилий в конструкции является система грузов, установленная по ее концам. При растяжении или сжатии конструкции грузы будут свободно перемещаться вверх или вниз.

С использованием проволок, выполненных из композиционного материала, температурные напряжения составят менее 0,5 %, следовательно, конструкция не потребует

специальных мер по регулированию усилий в струнах. Целесообразно использование жесткой заделки струн в анкерную опору.

Процесс колебания происходит от деформации, изменения напряженности и формы во всех точках колебательной системы. Следовательно, полный процесс колебания происходит с различными скоростями в зависимости от усилий, их направлений, массы, упругости и способности к изгибным колебаниям, синхронности и времени задержки масс. Важнейшим признаком колебания является нелинейность всех параметров. Единственный линейный параметр в колебаниях — частота колебаний, который зависит от массы и жесткости. Он линейный при стабильности этих параметров и параметрах давления и температуры воздуха [5].

Ниже приведена зависимость между частотой поперечного колебания, натяжением, площадью поперечного сечения, плотностью материала и длиной струны.

$$f = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\rho A}}, \quad (4)$$

где f — частота поперечных колебаний струны, Гц; n — число полувольт (1, 2, 3, ...); L — длина пролета, м; T — величина натяжения струны, Н; ρ — плотность материала струны, кг/м³; A — площадь поперечного сечения струны, м².

Струны, выполненные из композиционных проволок, совершают большее число колебаний в секунду по сравнению со стальными проволоками, следовательно, период колебаний у композиционных проволок будет ниже.

Оценка аэродинамической устойчивости рельсострунной путевой структуры проверялась из следующего условия:

$$1,5V_p \leq V_{кр}, \quad (5)$$

где V_p — расчетная скорость ветра для данного района, м/с; $V_{кр}$ — критическая скорость, м/с.

Критическая скорость — это скорость, при которой может произойти потеря аэродинамической устойчивости. Определяется экспериментально-теоретическим путем. В первом приближении данную скорость можно найти, используя методику В.Г. Курлянда [6], выработанную экспериментально в аэродинамической трубе для различных сечений конструкций:

$$V_{кр.м} = V_{кр} \omega_k B, \quad (6)$$

где $V_{кр.м}$ — приведенная критическая скорость, полученная из испытаний моделей в аэродинамической трубе; ω_k — частота крутильных свободных колебаний, Гц; B — ширина конструкции, м.

Частота крутильных свободных колебаний может быть определена по эмпирической формуле, при этом изгибной жесткостью струны в связи с ее малостью пренебрегаем:

$$\omega_k = \frac{n\pi B}{Lr} \sqrt{\frac{1}{m} \left(T + \frac{2GJ_k}{B^2} \right)}, \quad (7)$$

где r — радиус инерции сечения, м; m — масса погонного метра конструкции, кг/м; GJ_k — крутильная жесткость конструкции, МПа·м⁴.

Расчеты показали, что собственные крутильные колебания в конструкции рельсо-струнной путевой структуры имеют высокие частоты, и получаемые по формуле (6) критические скорости существенно выше расчетных скоростей для разных ветровых районов.

Низкие частоты, возникающие в конструкции, опасны из-за появления резонанса при пропуске подвижного состава. Следовательно, необходимо предусмотреть меры по регулированию колебаний в конструкции. Регулирование колебаний производится путем их гашения специальными устройствами — демпферами.

Для демпфирования используется динамический гаситель — преобразователь механической энергии колебаний и вибраций в механическую энергию колебаний сосредоточенного тела. В динамическом гасителе для гашения колебаний используется явление антирезонанса. Принцип действия динамического гасителя заключается в создании гасителем силы, направленной противоположно возмущающей силе. Настройка динамического гасителя заключается в подборе его собственной частоты: собственная частота гасителя должна быть равна частоте тех колебаний, амплитуду которых необходимо уменьшить («погасить») [7, 8].

Собственная частота колебаний демпфера в первом приближении представлена формулой

$$\omega_d = \sqrt{\frac{c}{m}}, \quad (8)$$

где c — жесткость пружины, кг/с²; m — масса подвешиваемого на пружину груза, кг;

$$c = \frac{Ed^4}{16(1+\nu)D^3n}, \quad (9)$$

где E — модуль упругости стали, Па; ν — коэффициент Пуассона; d — средний диаметр проволоки пружины, м; D — средний диаметр пружины, м; n — число рабочих витков пружины, шт.

Таким образом, в первом приближении путем итераций получаем необходимые параметры уравнения (9), такие, чтобы удовлетворялось условие

$$\omega_d = \omega, \quad (10)$$

где ω — частота собственных колебаний конструкции струнного рельса, Гц.

Физически полученные результаты означают, что в любой момент времени реакция груза демпфера уравновешивает возмущающую силу, приложенную к конструкции.

При установке динамического гасителя амплитуда на частоте настройки резко снижается, однако в системе вместо одной собственной частоты возникает две. Поэтому динамические гасители эффективны только в узком диапазоне частот вблизи частоты настройки гасителя, и только если частота возбуждения является строго постоянной. Устранить резонансные колебания с большими амплитудами при изменяющихся частотах оказывается возможным, если ввести в конструкцию динамического гасителя трение.

Для численного анализа в конечно-элементной среде *MIDAS/Civil* была создана математическая модель, представленная цепной линией. Проведенный анализ показал полное соответствие результатам аналитического расчета с учетом принятых допущений. Разница в показаниях составила менее пяти процентов.

Однако, несмотря на положительные результаты проведенного исследования, при практической реализации струнной транспортной системы, внедрении струнного транспорта в инфраструктуру города, необходимо проведение дополнительных исследований, касающихся обеспечения безопасности и надежности функционирования струнной транспортной системы. Должен быть разработан принципиально новый подвиж-

ной состав и обустройства струнной транспортной системы. Для сооружения струнных систем потребуется разработка специальных технологических схем.

Библиографический список

1. Юницкий А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в космосе. Гомель, 1995. 337 с.
2. «Фонд Байбакова». ПРОЕКТ 68. Струнная транспортная система Юницкого. Юницкий А.Э. URL: <http://www.fondbaybakova.ru/>
3. Струнные технологии Юницкого. Будущая реальность. URL: <http://yunitskiy.com/>
4. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84*/ОАО «ЦНИИС». Утв. 28.12.2010 г. Минрегионом России. М.: ОАО ЦПП, 2011. 340 с.
5. Ванжа В.Ф. Проблемы вибраций и теории колебания. URL: <http://vadim-vanzha.narod.ru/russian/index.htm>
6. Курлянд В.Г. Аэродинамические и аэроупругие характеристики пролетных строений мостов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1981. 20 с.
7. Загора А.Л. Гашение колебаний мостовых конструкций. М., 1983.
8. Системы с распределенными параметрами и прикладные вопросы динамики. URL: <http://distance.net.ua/Russia/Dinamika/laborator/razdel3.htm>

A.N. Yashnov, A.P. Suliaev. The Problem of Wire Prestressed-Reinforced Structure of Bridge Spans.

The article analyses problems of possibility and reasonability of railway engineering structures design for wire transport. The findings show that, from the technical point of view, there are no limitations for construction with spans up to 100 m for individual passenger vehicles with the mass up to 3 tons. Only composite materials can be used as main bearing elements (wires).

Key words: *wire transport, composite materials, flexible wire.*