

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian journal of transport engineering <http://t-s.today/>

2015, Том 2, №3 / 2015, Vol 2, No 3 <http://t-s.today/issues/vol2-no3.html>

URL статьи: <http://t-s.today/PDF/02TS315.pdf>

DOI: 10.15862/02TS315 (<http://dx.doi.org/10.15862/02TS315>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Овчинников И.Г., Кокодеев А.В. Об идее самонапряженных конструкций «тенсегрити»: история, основные аспекты и перспективы использования при строительстве мостовых сооружений // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», Том 2, №3 (2015) <http://t-s.today/PDF/02TS315.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

For citation:

Ovchinnikov I.G., Kokodeev A.V. [The paper provides an in-depth study conducted by the authors regarding potential application of "Tensegrity" concept in the bridges construction] Russian journal of transport engineering, 2015, Vol. 2, no. 3. Available at: <http://t-s.today/PDF/02TS315.pdf> (In Russ.)

УДК 624.042

Овчинников Игорь Георгиевич

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Россия, Саратов¹

Профессор кафедры «Транспортное строительство»

Профессор

Доктор технических наук

Действительный член МАН ВШ, РАТ, РОНКТД, АИН РФ, ASCE, IABSE, RILEM

E-mail: bridgesar@mail.ru

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_items.asp?authorid=2922

Кокодеев Артемий Витальевич

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Россия, Саратов

Студент 5-ого курса спец. «СМТ»

E-mail: artemkokodeev@gmail.com

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_items.asp?authorid=751214

Об идее самонапряженных конструкций «тенсегрити»: история, основные аспекты и перспективы использования при строительстве мостовых сооружений

Аннотация. В работе авторами проведено углубленное исследование потенциала использования идеи «тенсегрити» при строительстве мостовых сооружений.

Проанализированы основные функции мостов, сложившиеся тенденции и способы их проектирования. Высказывается предположение о необходимости повышения эффективности работы мостовых сооружений, которого возможно добиться путем использования оболочечных конструкций, а также применения многоэлементных предварительно напряженных стержневых конструкций.

Проведен обзор истории формирования идеи «тенсегрити». Приведены ее определения, основные аспекты и положения. Освещены известные «тенсегрити» сооружения и их конструкции, к примеру «Геодезический купол» Р.Б. Фуллера, Олимпийский стадион в Мюнхене, «тенсегрити» конструкции Кеннета Снелсона и др.

¹ РФ, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, к. 6, кафедра «Транспортное строительство»

Рассмотрена возможность использования концепции «тенсегрити» при строительстве пешеходных мостов. Приведены примеры мостов «тенсегрити», в т.ч. известный мост Курилпа Бридж в Австралии. Проанализированы конструктивные особенности сооружений. Отмечены основные преимущества и недостатки использования конструкций «тенсегрити» в мостостроении.

В заключении авторы предполагают, что конструкции «тенсегрити» имеют большой потенциал для дальнейшего внедрения в сферу мостостроения с целью улучшения архитектурно-технических показателей мостовых сооружений и потому нуждаются в дальнейшем тщательном теоретическом и экспериментальном исследовании, которое будет проводиться авторами в следующих работах.

Ключевые слова: транспортное сооружение; мост; функции моста; силовые схемы; эффективность проектирования; оболочечные конструкции; самонапряженные системы; растяжение; сжатие; конструкции «тенсегрити»; мосты «тенсегрити»

Введение

В мировом мостостроении длительное время находили применение четыре основных силовых схемы пролетных строений: балка (ферма), арка, висячая и вантовая системы. И при проектировании сооружения с вантовой или висячей системой инженеры разделяли конструкции сооружения на отдельные составные части: одни, работающие на растяжение (кабели, тросы, ванты), и другие, работающие на сжатие (пилоны, опоры). Все известные силовые схемы мостовых сооружений подразумевают восприятие ими нагрузок и их передачу на основание.

Нельзя говорить о потере существующими силовыми схемами своей актуальности, однако не во всех случаях они представляются наиболее эффективными. И поэтому представляют интерес новые виды конструкций мостов, позволяющие более полно и эффективно использовать работу их как пространственных систем.

В середине XX века известный ученый и инженер Ф.Р. Шенли в своих работах высказывал идею о том, что сооружения предназначены для пропуска силовых потоков сквозь составляющие конструкции на грунт, и потому их надо конструировать таким образом, чтобы силовые потоки, порождаемые нагрузками, как можно скорее, по наикратчайшему пути проходили по конструкциям и передавались на грунт [1]. Эта интересная гидравлическая аналогия может оказать помощь в выборе формы сооружения, наиболее эффективно передающего силовые потоки сквозь себя, по возможности не задерживая их. Очевидно, что наиболее эффективный способ передачи усилий – передача их вдоль элемента. Так работают растягиваемые (тросы, кабели, подвески) или сжимаемые силы, действующие вдоль оси элементы (стойки, опоры, пилоны, колонны). Правда, в случае действия сжимающих усилий возникает необходимость ограничивать длины элементов с целью недопущения потери ими устойчивости. Наиболее неприятна передача сил поперек оси элемента, как, например, в случае поперечного изгиба балок. В этом случае поперечная передача силы приводит к появлению дополнительного силового фактора – изгибающего момента, который и является расплатой за поперечный перенос силы. Причем часто эта расплата оказывается весьма большой, т.к. изгибаемые элементы мы обычно рассчитываем не на действие касательных напряжений, которые и обеспечивают передачу силы параллельно самой себе, а на действие по сути дела «паразитного» изгибающего момента, приводящего к появлению нормальных напряжений, действующих вдоль оси балки. Изменяя форму конструкции, мы можем уменьшить долю «паразитных» усилий. Например, изгибая балку, и превращая ее в арку, мы

можем уменьшить величину изгибающего момента. Также можно увеличить жесткость плоского листа бумаги, который изгибается даже от своего веса, предварительно хотя бы немного изогнув его, то есть, придав ему форму оболочки.

Поэтому очевидно, что необходимо искать пути повышения эффективности мостовых конструкций, используя такие направления, как применение оболочечных конструкций, а также применение многоэлементных предварительно напряженных стержневых конструкций.

Новым направлением в строительстве является использование самонапряженных систем, в которых часть элементов работает на сжатие за счет предварительного растяжения (напряжения) других элементов. Идея «тенсегрити» возникла в первой половине XX века. Она нашла широкое применение в искусстве, производстве мебели и систем освещения, в создании скульптур и необычных конструкций, разбросанных по всему миру.

В настоящее время крайне перспективным направлением применения идеи «тенсегрити» является область транспортного строительства. Сейчас в объектах транспортной инфраструктуры уже можно обнаружить отдельные конструктивные элементы – «тенсегрити», такие, как ванты и кабели у вантовых и подвесных мостов.

Использование в транспортном строительстве идеи «тенсегрити» послужит созданию сооружений, в т.ч. пешеходных и велосипедных мостов и путепроводов, имеющих высокие архитектурные показатели и обеспечивающих безопасное транспортное сообщение, при достаточной простоте конструкций и невысоких затратах на строительство и эксплуатацию благодаря эффективному использованию материала.

Определение

К настоящему времени известно несколько широко принятых определений «тенсегрити» (от англ. *tension* – напряжение или растяжение, и *integrity* – целостность). В 1962 г. описание конструкций «тенсегрити» было дано Ричардом Бакминстером Фуллером в его патенте «Конструкции с соединением путем натяжения». Он охарактеризовал конструкции «тенсегрити» как «острова напряжения в океане сжатия» [1].

По определению Р. Мотро, «тенсегрити - это система, находящаяся в равновесном состоянии, и содержащая набор элементов, работающих на сжатие и растяжение» [2].

Р.Е. Скелтон предложил такую формулировку: «Конструкция тенсегрити – это устойчивая конструкция, состоящая из соединенных в узлах сжатых стержней».

Согласно работе [3], «тенсегрити – это структурный принцип, основанный на использовании изолированных элементов, находящихся в сжатом состоянии в непрерывной сети растянутых элементов, причем так, что элементы, работающие на сжатие (обычно это распорки или стойки), не соприкасаются друг с другом».

Как мы видим, все предложенные определения объединяет формулировка «о совместной работе на растяжение и на сжатие конструкции, находящейся в равновесии».

Историческая справка

Первым аспекты идеи конструкций «тенсегрити» сформулировал и продемонстрировал советский художник Карл Иогансон (1890-1929 гг.).

На II Выставке Общества молодых художников в 1921 г. Иогансон выставил «самонапряженные конструкции» (рис. 1), которые, по мнению художника Вячеслава Колейчука, позднее полностью реконструировавшего эту выставку в Третьяковской галерее по двум сохранившимся фотографиям, предвосхитили идею «тенсегрити», впоследствии

активно разрабатывавшуюся с 1950-х гг. Кеннетом Снельсоном, Ричардом Б. Фуллером и Дэвидом Ж. Эммерихом [4].

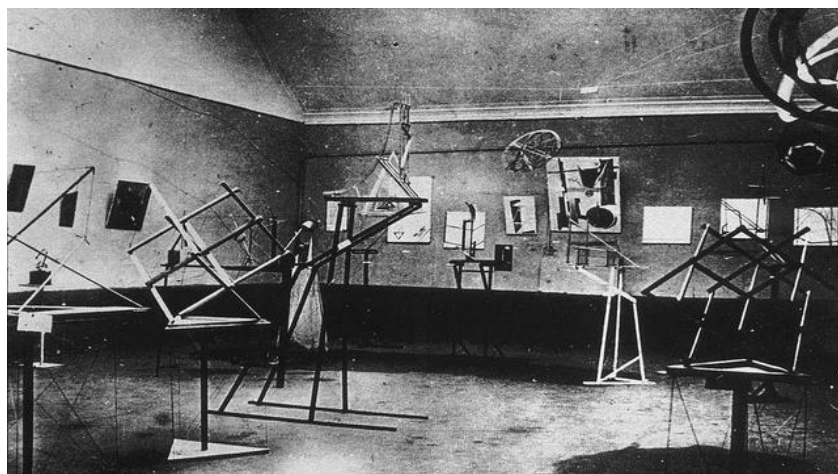


Рисунок 1. Работы Иогансона на II Выставке молодых художников, 1921 г.

Источник: <https://tensegrity.wikispaces.com/Ioganson,+Karl>

Figure 1. Joganson works on II exhibition of art students, 1921

Source: <https://tensegrity.wikispaces.com/Ioganson,+Karl>

Сам же Карл Иогансон так характеризовал свое творчество: «От живописи к скульптуре, от скульптуры к конструкции, от конструкции к технологии и изобретению – это и есть выбранный мной путь, и, безусловно, это конечная цель любого художника-революционера».

Предложенная самонапряженная конструкция «тенсегрити» Иогансона («Gleichgewichtkonstruktion») представляла собой совместную работу трех ребер, семи напряженных тросов и одного ненапряженного троса, поддерживающего равновесие.

Данный модуль «тенсегрити» в большинстве источников указывается как первая конструкция, отвечающая основным аспектам идеи «тенсегрити». Хотя у такого мнения есть и скептики.

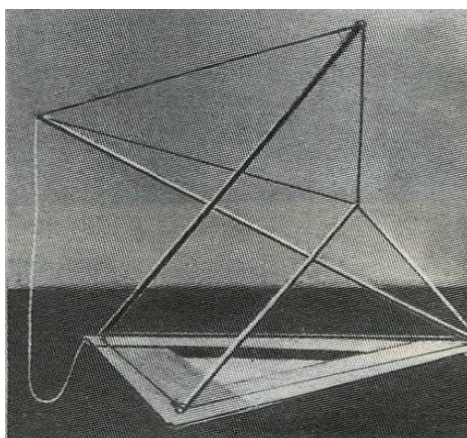


Рисунок 2. Самонапряженная конструкция Иогансона, 1921 г.

Источник: https://de.wikipedia.org/wiki/Karl_Ioganson

<https://tensegrity.wikispaces.com/Ioganson,+Karl>

Figure 2. The Ioganson' self-stressed structure, 1921

Source: https://de.wikipedia.org/wiki/Karl_Ioganson

<https://tensegrity.wikispaces.com/Ioganson,+Karl>

К примеру, французский инженер и архитектор Д.Ж. Эммерих (1925-1996 гг.) в своей работе «Structures tendues et autotendants» о конструкциях «тенсегрити» на основе призм скептически относился к заслугам конструктивистов, в частности Йогансона, в развитии идеи самонапряженных конструкций. Сам Эммерих внес значительный вклад в исследования идеи



Рисунок 3. Геодезический купол, павильон США, ЭКСПО-1967, автор Б. Фуллер

Источник:

https://en.wikipedia.org/wiki/Geodesic_dome

Figure 3. Geodesic dome, USA pavilion, EXPO-1967, author B. Fuller

Source: https://en.wikipedia.org/wiki/Geodesic_dome

дизайна и архитектуры, наиболее известным из которых является лёгкий и прочный Геодезический купол «Биосфера» (рис. 3), открытый на Всемирной выставке ЭКСПО-1967 в Монреале, Канада. Сооружение представляет собой пространственную стальную сетчатую оболочку из прямых стержней. Конструктивные особенности купола позволяют судить о сооружении как об имеющем элементы «тенсегрити».

Бакминстер Фуллер подарил миру широкий круг идей, разработок и изобретений, в частности в областях практичного недорогого жилья и перевозок. Однако в исследовании идеи «тенсегрити» куда большего успеха, чем сам Фуллер, добился его ученик, Кеннет Снельсон. Однажды, увидя новый проект скульптуры Снельсона (рис. 4), Фуллер понял, чего искал в течение многих лет в области «тенсегрити». Позднее Снельсон утверждал, что профессор Фуллер присвоил себе открытую Снельсоном концепцию «напряженной целостности», открытую именно Снельсоном.

Ныне Кеннет Снельсон (1927 г.) – фотограф, скульптор и инженер, конструкции «тенсегрити» которого разбросаны по всему миру в виде удивительных сооружений и достопримечательностей. Среди них 18-метровая «Needle Tower II» (1969 г.), «Моцарт I» (1982 г.), «Радужная арка» (2001 г.), «Спящий дракон» (2003 г.) и др.

Снельсон избегал излишне глубоких математических и физических подходов во время создания проектов своих конструкций, полагаясь на свою интуицию, и при этом создавал конструкции самых различных конфигураций, ассиметричных, нетрадиционных, и хрупких на

«тенсегрити», в частности, в становление конструктивной морфологии. В 1964 г. он представил свой патент No. 1,377,290, «Construction de Reseaux Autotendants», в котором рассматривался вопрос применимости идеи «тенсегрити» к различным конструкциям [5].

Ричард Бакминстер Фуллер (1895-1983 гг.), американский архитектор, дизайнер и инженер, является создателем большого числа изобретений, в основном в сфере

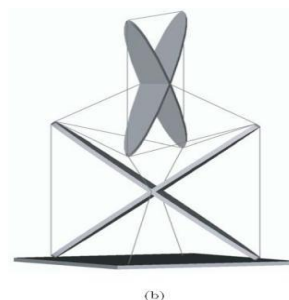


Рисунок 4. Первая скульптура Снельсона

Источник:

<http://kennethsnelson.net/sculptures/>

Figure 4. The first sculpture of Snelson

Source:

<https://kennethsnelson.net/sculptures/>

вид, как, например, построенная в 1977 г. металлическая конструкция «Easy Landing» (рис. 5) размерами 10x25x20 м [6].



Рисунок 5. «Easy Landing», Балтимор, США. Работа К. Снельсона, 1977 г.
Источник: <http://kennethsnelson.net/sculptures/outdoor-works/easy-landing/>
Figure 5. "Easy Landing", Baltimore, USA. K. Snelson's art, 1977
Source: <http://kennethsnelson.net/sculptures/outdoor-works/easy-landing/>

Нет сомнений в том, что труды советского художника Иогансона и его «самонапряженные конструкции» в той или иной степени повлияли на ход развития идеи «тенсегрити», и в т.ч. на работы Эммериха, Снельсона и др.

Концепция и основные характеристики

Основным преимуществом конструкций «тенсегрити» является их легкость. Распорки работают только на сжатие, кабели и ванты – только на растяжение. Полезные нагрузки от сжатия и растяжения равномерно распределяются по всей конструкции, и каждый конструктивный элемент воспринимает определенную часть действующей нагрузки. Это приводит к эффективности использования материала, а также к высокому соотношению прочность/вес. В сущности, конструкции «тенсегрити» состоят из распорок, соединенных связями, в результате чего обеспечивается устойчивость и прочность, а также визуальный вид «летающих распорок» («floating struts») [1].

Данные конструкции можно рассматривать как подкласс подвесных или вантовых конструкций. Однако отличие в том, что в конструкциях «тенсегрити» растягивающие усилия не передаются на анкера (опоры), как в случае с вантовыми или подвесными конструкциями. Стабильность и жесткость конструкций «тенсегрити» обеспечивается самоуравновешиванием и самонапряжением составляющих систему растянутых и сжатых элементов. Особенность конструкций «тенсегрити» состоит в том, что их элементы, работающие на сжатие, не соприкасаются друг с другом, а также не распространяют друг на друга сжимающие усилия, действующие на каждый из элементов.

Концепцию конструкций «тенсегрити» можно определить как сумму нескольких простых принципов проектирования [1, 7-9]:

- 1) нагруженные элементы находятся в состоянии и либо чистого сжатия, либо чистого растяжения, а это означает, что состоящая из этих элементов

конструкция может разрушиться либо вследствие обрыва тросов, либо вследствие потери устойчивости стержней;

- 2) предварительное напряжение придает тросам жесткость при работе и на растяжение и на сжатие;
- 3) конструкция обладает механической устойчивостью, позволяющей ее элементам оставаться в растянутом или сжатом состоянии даже при увеличении напряжений в элементах конструкции.

Применение идеи «тенсегрити» в различных областях

«Тенсегрити» - интересная и перспективная идея, к которой всё с большим интересом обращаются архитекторы, скульпторы и другие специалисты. Существует множество способов и областей ее применения. Даже в природе и биологии зачастую можно встретить подобия конструкциям «тенсегрити», к примеру, в теле человека (соединения клеток, ДНК).

Приведем обзор наиболее известных примеров применения идеи «тенсегрити» при сооружении различного рода конструкций.

Геодезический купол Р.Б. Фуллера

Проект данного сооружения был разработан Фуллером еще в 1953 году. Сооружение (рис. 3) представляет собой замкнутое стальное строение, 76 м в диаметре и 62 м в высоту, собранное из стержней, образующих геодезическую структуру, благодаря которой сооружение в целом обладает хорошей несущей способностью. Геодезический купол является несущей сетчатой оболочкой. Форма купола образуется благодаря особому соединению балок - в каждом узле сходятся ребра слегка различной длины, которые в целом образуют многогранник, близкий по форме к сегменту сферы. Хотя в конструкции купола есть отдельные элементы «тенсегрити», в полной мере называть сооружение «тенсегрити» нельзя.

Скульптуры и конструкции К. Снельсона

Кеннет Снельсон является самым известным и крупнейшим скульптором конструкций «тенсегрити». Во время становления своего таланта, он пришел к идее новой скульптурной эстетики, основанной на фундаментальных силах растяжения и сжатия. Свою первую башню «тенсегрити» он построил в 1968 году. В настоящее время она находится в саду скульптур музея Хиршхорна в г. Вашингтон, США. Башня представляет собой полностью конструкцию «тенсегрити», и достигает в высоту 18 м. В музее Кроллер Мюллер в Нидерландах сооружена еще одна башня «тенсегрити» Снельсона, уже 30 м в высоту. Эти и другие башни Снельсона собраны из модулей «тенсегрити», состоящих из трех распорок и трех кабелей. К настоящему времени скульптуры и фотографии Снельсона выставляются на более чем 25 персональных выставках в галереях по всему миру.

Вантовые конструкции

В гражданском строительстве идеи «тенсегрити» не использовались вплоть до 1988 года, а именно до строительства Олимпийского стадиона к Летней Олимпиаде в Сеуле. До этого в 1972 г. немецкий инженер Отто Фрей (1925-2015 гг.) сделал определенный шаг в сторону развития и внедрения идеи «тенсегрити» в строительстве, представив проект Олимпийского стадиона с натяжной крышей к Летней Олимпиаде в Мюнхене. Позднее многие дизайнеры, архитекторы и инженеры брали за основу своих проектов идею «тенсегрити» с основным конструктивным несущим элементом в виде кабелей и вант.

Собственно говоря, конструкции «тенсегрити» являются подкатегорией кабельных и вантовых сооружений.

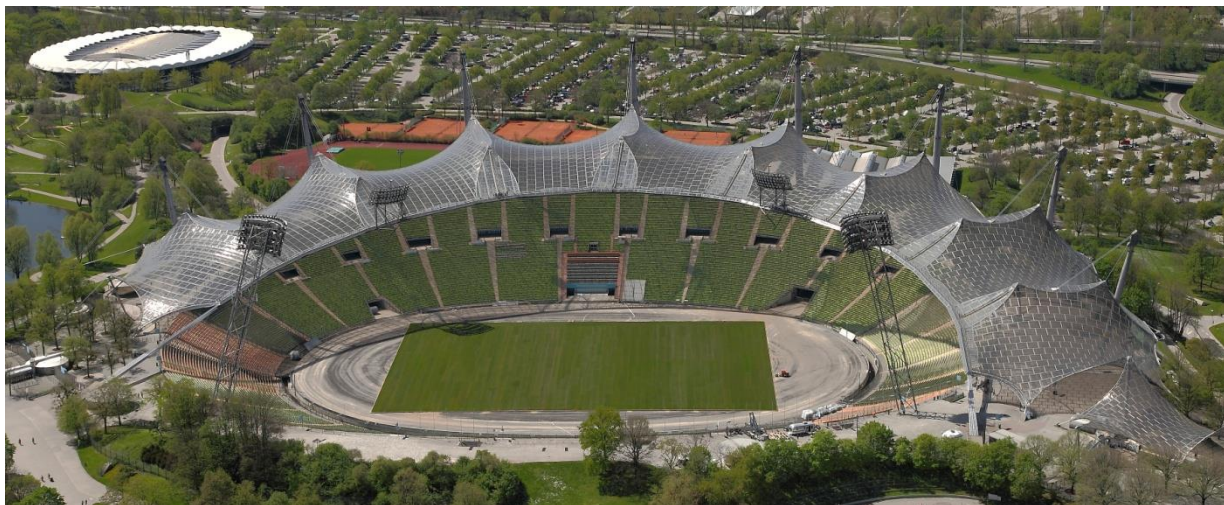


Рисунок 6. Олимпийский стадион в Мюнхене

Источник: <http://realestate.aol.com/blog/gallery/olympic-stadiums-then-and-now/>

Figure 6. Olympic stadium in Munich

Source: <http://realestate.aol.com/blog/gallery/olympic-stadiums-then-and-now/>

Купола

В настоящее время во многих больших сооружениях конструкция кровли представляет собой купол с конструктивными элементами в виде кабелей и вант. Данный вид кровли был изобретен американским инженером Дэвидом Х. Гейгером (1935-1989). Концепция изобретения Гейгера проиллюстрирована на рисунке 7. Несущими элементами купола являются металлические кольца и кабели, а также вертикальные распорки, необходимые для напряжения в кабелях. Конструктивными элементами купола являются модули «тенсегрити», состоящие из трех распорок, соединенных между собой. Конструкция купола подразумевает легкость и устойчивость.

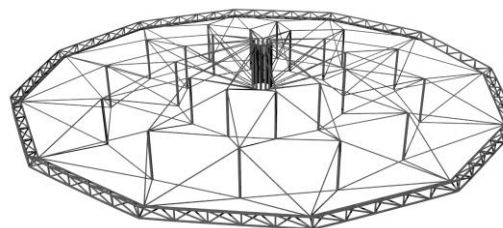


Рисунок 7. Концепт купола Гейгера

Источник:

<https://www.tue.nl/en/university/departments/built-environment/research/thesis/projects/>

Figure 7. Concept of the Geiger's dome

Source:

<https://www.tue.nl/en/university/departments/built-environment/research/thesis/projects/>

«Тенсегрити» в робототехнике

Легкие, гибкие, адаптируемые под различные нужды, и при этом прочные и устойчивые конструкции «тенсегрити» имеют существенный потенциал использования в робототехнике. Так, шведский инженер Гуннар Тиберт в своей докторской диссертации [10] исследует и анализирует возможность использования развертываемых конструкций «тенсегрити» в космических программах.

Мебель и декор

В настоящее время идея «тенсегрити» активно внедряется в производство мебели и элементов декора (рис. 8) в виде навесных ламп, стеклянных панелей и т.п.



Рисунок 8. Пример использования принципов «тенсегрити» в предметах декора

Источник: <http://www.decoracion.ru/interior/catalog/90101026/>

Figure 8. Usage sample of "tensegrity" principles in the decor items

Source: <http://www.decoracion.ru/interior/catalog/90101026/>

Использование идеи «тенсегрити» при строительстве транспортных сооружений

Отдельно рассмотрим примеры применения идеи «тенсегрити» при строительстве транспортных сооружений, в т.ч. пешеходных и велосипедных мостовых сооружений.

Первый проект пешеходного моста «тенсегрити» - мост «Миллениум» в Лондоне

Впервые предположения о возможности использования теории «тенсегрити» при проектировании мостов были выдвинуты в 1996 году [11]. В рамках конкурса по представлению проектов пешеходного моста Миллениум через р. Темза в Лондоне компания «Мотт МакДональд» предложила свой концептуальный проект моста Миллениум в Лондоне (рис. 9). Однако в итоге Миллениум был построен по другому проекту.



Рисунок 9. Проект пешеходного моста Миллениум через р. Темза в Лондоне, 1996 г.

Источник: <http://tensegrity.wikispaces.com/Bridges>

Figure 9. Design of Millenium pedestrian bridge across the river Thames in London, 1996

Source: <http://tensegrity.wikispaces.com/Bridges>

Пешеходный мост в Пурмеренде, Нидерланды

Более ощутимый шаг в направлении использования идей «тенсегрити» при строительстве мостов был сделан в 1998 году, когда был утвержден проект пешеходного и велосипедного моста в г. Пурмеренд, Нидерланды [9]. Основное требование к представляемым на конкурс проектам было основано на максимальной экономии материала, а также минимальном воздействии на экологическую систему местности и полной интеграции в нее. Заказчики строительства моста в Пурмеренде хотели получить, в конечном счете, некое особенное сооружение. Мост Стоккенбридж (рис. 10) был открыт в июне 2001 года по проекту и при непосредственном авторском надзоре архитектора Йорда ден Холландера. Общая длина моста – 128 м, ширина – 3,5 м. Легкая конструкция моста «тенсегрити» имеет 36 стоек, представляющих собой трубы круглой формы и работающих на сжатие, а также множество вант, работающих на растяжение. Особенностью моста является тот факт, что мачты и пролетное строение не соединены друг с другом напрямую, а через ванты.



Рисунок 10. Мост «тенсегрити» в Пурмеренде, Нидерланды.

Источник: <http://tensegrity.wikispaces.com/Bridges>

Figure 10. The "tensegrity" bridge in Purmerend, Netherlands

Source: <http://tensegrity.wikispaces.com/Bridges>

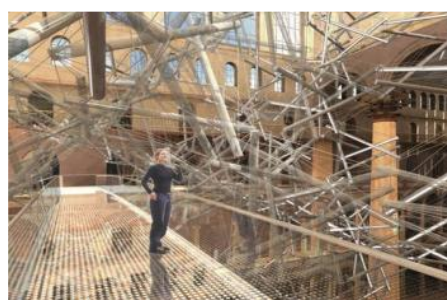


Рисунок 11. Пешеходный мост в Национальном музее в Вашингтоне, США

Источник:

<http://tensegrity.wikispaces.com/Bridges>

Figure 11. The pedestrian bridge in the National museum in Washington, USA

Source:

<http://tensegrity.wikispaces.com/Bridges>

Мост «тенсегрити» в Национальном музее

В 2002 г. в Большом зале Национального музея в Вашингтоне компаниями *Wilkinson Eyre* и *Arup* был представлен 35-метровый пешеходный мост «тенсегрити», соединивший различные галереи музея (рис. 11).

Пешеходный мост Тор Вергата

В 2005 году исследовательская группа по системам «тенсегрити» Университета Рима и глава группы Андреа Мичелетти представили проект пешеходного моста Тор Вергата (рис. 11, а), который должен быть построен около корпусов Факультета Инженерии Университета Рима. Мост «тенсегрити» позволит пешеходам безопасно и комфортно пересекать одну из главных транспортных артерий студгородка [1].



Рисунок 11. Проект пешеходного моста Тор Вергата в Риме, Италия:
а) общий вид моста; б и в) – модули «тенсегрители» конструкции моста
Источник: <http://tensegrity.wikispaces.com/Bridges>

Figure 11. Design of the Tor Vergata pedestrian bridge in Rome, Italy:
а) overall view of bridge; b and c) – "tensegrity" modules of bridge structure
Source: <http://tensegrity.wikispaces.com/Bridges>

Данный проект пешеходного моста представляет собой, нетривиальный пример использования конструкций «тенсегрители». Полная длина моста – 32 метра, габарит прохожей части - 2,6 м, ширина - 3 м. Конструкция моста состоит из пяти одинаковых пятигранных модулей (рис. 11, б), каждый из которых представляет собой внутренне самостоятельную устойчивую конструкцию «тенсегрители». Как утверждают разработчики, проведенные исследования показывают, что конструкция моста будет подвержена лишь незначительным вибрационным нагрузкам.

Проект пешеходного моста «тенсегрители» в Швейцарии

В работе [11] был предложен проект пешеходного моста «тенсегрители», имеющего конструкцию «полого каната», который будет построен в Швейцарии (рис. 12). Сооружение будет перекрывать пролет в 20 м, и состоять из четырех одинаковых модулей «тенсегрители». Симметрия конструкции будет обеспечена путем зеркального отображения двух модулей. Габарит прохожей части – 2.5 м, ширина – 1.3 м. Этих размеров будет достаточно для прохода двух человек, одновременно пересекающих мост.

При проектировании конструкции моста «тенсегрители» предполагалось две стадии ее работы: во время предварительного напряжения при монтаже и в процессе эксплуатации под рабочей нагрузкой. Во время первой стадии силы предварительного напряжения, воздействуя на конструкцию «тенсегрители», исключают ослабление кабелей и появление чрезмерных прогибов пролетного строения под действием собственного веса. Во время стадии эксплуатации конструкция «тенсегрители» считается полностью работоспособной. Граничные условия по структуре идентичны на обеих стадиях. При этом перемещения узлов, расположенных на обоих концах пролетного строения исключены во всех направлениях.



Рисунок 12. Пешеходный мост «тенсегрители», имеющий конструкцию «полый канат»
Источник: <http://tensegrity.wikispaces.com/Bridges>

Figure 12. The "tensegrity" pedestrian bridge with construction of "hollow rope"
Source: <http://tensegrity.wikispaces.com/Bridges>

Проект пешеходного моста «тенсегрити» через р.Сезия в Италии

Проект пешеходного «подвесного моста – тенсегрити» через реку Сезия, Италия (рис. 13), был разработан Стефано Парадисо и Марко Муседолой [12]. Сооружение будет располагаться между железнодорожным мостом для высокоскоростного движения и автомагистралью А4, и будет находиться на велосипедном маршруте, который планируется организовать через все европейские страны. Конструкция моста «тенсегрити» легкая, не требует устройства промежуточных опор, при этом весьма экономична с точки зрения расхода материала.

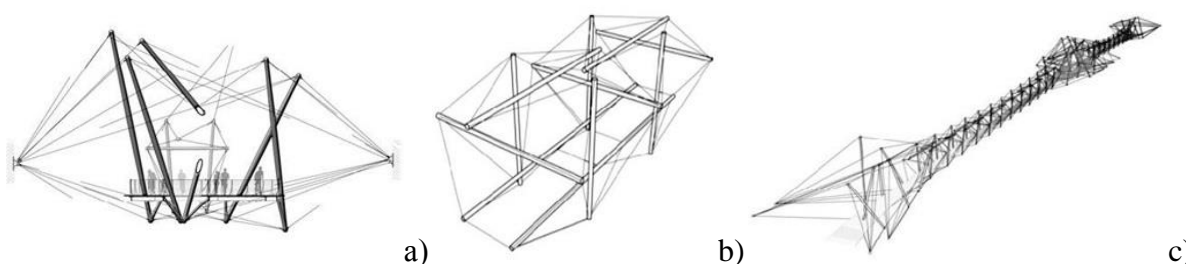


Рисунок 13. Проект «Подвесного моста – тенсегрити» в Италии. Авт. С. Парадисо и М. Муседола: а) поперечное сечение моста. б) элемент моста из двух модулей «тенсегрити». в) общий вид моста «тенсегрити».

Источник: <http://tensegrity.wikispaces.com/Bridges>

Figure 13. Design of the "tensegrity cable suspension bridge" in Italy Authors: S. Paradiso and M. Mucedola: a) cross-sectional view of bridge. b) bridge member consisting of two "tensegrity" modules. c) overall view of "tensegrity" bridge.

Source: <http://tensegrity.wikispaces.com/Bridges>

Проект пешеходного моста «тенсегрити» в Санкт-Петербурге

Еще один концепт мост «тенсегрити» от компании *Wilkinson Eyre*. Проект (рис. 14) предполагал строительство моста в районе Апрашкиного двора в Санкт-Петербурге.



Рисунок 14. Проект пешеходного моста «тенсегрити» в Санкт-Петербурге

Источник: <http://tensegrity.wikispaces.com/Bridges>

Figure 14. Design of the "tensegrity" pedestrian bridge in St. Petersburg

Source: <http://tensegrity.wikispaces.com/Bridges>

Пешеходный и велосипедный мост Курилпа Бридж, Австралия

Мост Курилпа в Брисбене, штат Квинсленд, Австралия, является крупнейшим мостом «тенсегрити» в мире [13]. Конструкции данного сооружения (рис. 15) построены на основе идей «тенсегрити», хотя этот мост и нельзя назвать конструкцией «тенсегрити» в полном соответствии с широко распространенными определениями «тенсегрити». Мост Курилпа представляет собой комбинацию классического вантового моста и моста «тенсегрити».

Данный сооружение представляет особый интерес, вследствие чего авторами в работе [7] было проведено подробное исследование и анализ конструктивных особенностей моста Курилпа Бридж.



*Рисунок 15. Крупнейший мост «тенсегрити» Курилпа Бридж, Австралия
Источник: <http://www.mirimar.com/site/gallery/daily-cruises-gallery>
Figure 15. The largest "tensegrity" Kurilpa bridge, Australia
Source: <http://www.mirimar.com/site/gallery/daily-cruises-gallery>*

Заключение

Очевидно, что необходимо искать пути повышения эффективности мостовых конструкций, используя такие направления, как применение оболочечных конструкций, а также применение многоэлементных предварительно напряженных стержневых конструкций.

Предполагаем, что в будущем будет наблюдаться рост использования теории «тенсегрити» в инженерных науках, в том числе и в мостостроении. Конструкции «тенсегрити» прекрасно работают и на растяжение, и на сжатие, и на изгиб, при этом весьма эффективно используют материал. А с учетом роста стоимости строительных материалов будет возрастать и потребность в инженерных конструкциях и методиках, позволяющих использовать материал более рационально и эффективно.

Конструкции «тенсегрити» представляют собой пространственные системы, которые распределяют все действующие на них нагрузки на множество их элементов. Самоуравновешенность и распределение напряжений между сжатыми и растянутыми

элементами этих конструкций приводит к тому, что для этих конструкций не требуется анкеровки (как в вантовых или висячих мостах) для того, чтобы воспринимать приложенную нагрузку, что и делает эти конструкции чрезвычайно легкими. Пешеходные мосты «тенсегрити» визуально выглядят довольно легкими, и привлекают внимание не только архитекторов и инженеров, но и простых людей.

Преимущества мостов «тенсегрити» заключаются в малом собственном весе конструкций, а также в их большей грузоподъемности по отношению к собственному весу по сравнению с традиционными конструкциями.

Мы полагаем, что конструкции «тенсегрити» имеют большой потенциал для дальнейшего внедрения в сферу мостостроения с целью улучшения архитектурно-технических показателей мостовых сооружений и потому нуждаются в дальнейшем тщательном теоретическом и экспериментальном исследовании, которое будет проводиться авторами в следующих работах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кокодеев А.В., Овчинников И.Г. Исследование возможностей применения самонапряженных конструкций («Тенсегрити») при создании транспортных сооружений / Инновации и исследования в транспортном комплексе: Сборник трудов III Международной научно-практической конференции в год 70-летия Победы в Великой Отечественной войне, 4-5 июня, 2015 г. / Курган, 2015. – С. 134-141. - [The research of self-stressed structures («Tensegriti») usege possibility while creating transport constructions // Kurgan, 2015].
2. Motro, R., Maurin, B., Silvestri, C. Tensegrity Rings and the Hollow Rope // In Proceedings of the IASS Symposium 2006, New Olympics, New Shells and Spatial Structures. – pp. 470-475.
3. Valentín Gómez Jáuregui. Tensegrity Structures and their Application to Architecture // School of Architecture Queen's University Belfast, September, 2004. – 239 p.
4. Wikipedia. - Electronic data. - 2014. - https://de.wikipedia.org/wiki/Karl_Ioganson.
5. David G. Emmerich. Structures tendues et autotendantes // Ecole d'architecture de Paris la Villette, 1988. – 420 p.
6. Kenneth Snelson. Art and Ideas // Web publication, Marlborough gallery, N.Y. 2013.- 174 p.
7. Кокодеев А.В., Овчинников И.Г. Анализ конструктивного решения крупнейшего моста - «тенсегрити» Курилпа Бридж // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №4 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/40TVN415.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/40TVN415. – [The analysis of constructive decisions of the largest «tensegrity» bridge - Kurilpa Bridge // On-line Journal «Naukovedenie», 7, №4, 2015].
8. Овчинников И.Г., Кокодеев А.В. Самонапряженные конструкции «тенсегрити» / Сборник трудов 15-ой Международной научно-технической конференции: «Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии», 30 июня – 3 июля, 2015 г. / ТулГУ, г. Тула, 2015 г. – С.80-81. – [Self-stressed structures - «Tensegriti» / Tula, 2015].
9. Boeck, J.D. Tensegrity bridges, Concept design of pedestrian bridges using tensegrity as load carrying system // Delft University of Technology, De Boeck Jan MSc, 2013. - 265 p.
10. Gunnar Tibert. Deployable Tensegrity Structures for Space Applications // Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Department of Mechanics, Stockholm, Sweden, 2002. – 220 p.
11. Landolf Rhode-Barbarigos, Nizar Bel Hadj Ali, Rene Motro, Ian F.C. Smith. Designing tensegrity modules for pedestrian bridges // Engineering Structures, Vol.32, No.4, 2010. - pp. 1158-1167.
12. Paradiso, S., Mucedola, M. Suspended bridge by Paradiso. - Electronic data. - 2015. - <http://tensegrity.wikispaces.com/Suspended+Bridge+by+Paradiso> (22.04.2015).
13. Kurilpa Bridge – a tensegrity world first. - Electronic data. - 2015. - http://www.oasysoftware.com/casestudies/casestudy/kurilpa_bridge_a_tensegrity_world_first (01.03.2015).

Ovchinnikov Igor Georgievich

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia, Saratov
E-mail: bridgesar@mail.ru

Kokodeev Artemy Vitalievich

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia, Saratov
E-mail: artemkokodeev@gmail.com

The paper provides an in-depth study conducted by the authors regarding potential application of "Tensegrity" concept in the bridges construction

Abstract. The basic bridges functions, current trends and methods of their design have been analyzed. The necessity of bridge structures efficiency improvement, which is to be implemented via shell structures and the multi-element prestressed beam structures application is suggested.

A review of the "Tensegrity" formation history has been conducted. There are its definition, basic aspects and conditions. The article highlights well-known "Tensegrity" structures and their design, e.g. "The Geodesic dome" by R.B. fuller, the Olympic stadium in Munich, "Tensegrity" structures Kenneth Snelson, etc.

The possibility of using the "Tensegrity" concept in the pedestrian bridges construction has been considered. There are examples of "Tensegrity" bridges including the famous Kurilpa bridge in Australia. The design features of structures analysis is provided. The main advantages and disadvantages of using "Tensegrity" structures in bridge construction are noted.

In conclusion, the authors suggest that the "Tensegrity" structure have great potential for further implementation in the field of bridge construction with the aim of improving architectural and technical parameters of bridge structures and therefore there is a need in further careful theoretical and experimental study, which is to be conducted by the authors in subsequent papers.

Keywords: transport construction; bridge; bridge functions; power circuits; efficiency of design; shell design; self-stressed systems; tension; compression; «tensegrity» structures; «tensegrity» bridges

REFERENCES

1. Kokodeev A.V., Ovchinnikov I.G. Issledovanie vozmozhnostey primeneniya samonapryazhennykh konstruksiy («Tensegriti») pri sozdanii transportnykh sooruzheniy / Innovatsii i issledovaniya v transportnom komplekse: Sbornik trudov III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii v god 70-letiya Pobedy v Velikoy Otechestvennoy voyne, 4-5 iyunya, 2015 g. / Kurgan, 2015. – S. 134-141. – [The research of self-stressed structures («Tensegriti») usege possibility while creating transport constructions // Kurgan, 2015].
2. Motro, R., Maurin, B., Silvestri, C. Tensegrity Rings and the Hollow Rope // In Proceedings of the IASS Symposium 2006, New Olympics, New Shells and Spatial Structures. – pp. 470-475.
3. Valentín Gómez Jáuregui. Tensegrity Structures and their Application to Architecture // School of Architecture Queen's University Belfast, September, 2004. – 239 p.
4. Wikipedia. - Electronic data. - 2014. - https://de.wikipedia.org/wiki/Karl_Ioganson.
5. David G. Emmerich. Structures tendues et autotendantes // Ecole d'architecture de Paris la Villette, 1988. – 420 p.
6. Kenneth Snelson. Art and Ideas // Web publication, Marlborough gallery, N.Y. 2013.- 174 p.
7. Kokodeev A.V., Ovchinnikov I.G. Analiz konstruktivnogo resheniya krupneyshego mosta - «tensegriti» Kurilpa Bridzh // Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIE» Tom 7, №4 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/40TVN415.pdf> (dostup svobodnyy). Zagl. s ekrana. Yaz. rus., angl. DOI: 10.15862/40TVN415. – [The analysis of constructive decisions of the largest «tensegrity» bridge - Kurilpa Bridge // On-line Journal «Naukovedenie», 7, №4, 2015].
8. Ovchinnikov I.G., Kokodeev A.V. Samonapryazhennye konstruksii «tensegriti» / Sbornik trudov 15-oy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii: «Aktual'nye problemy stroitel'stva i stroitel'noy industrii», 30 iyunya – 3 iyulya, 2015 g. / TulGU, g. Tula, 2015 g. – S.80-81. – [Self-stressed structures - «Tensegriti» / Tula, 2015].
9. Boeck, J.D. Tensegrity bridges, Concept design of pedestrian bridges using tensegrity as load carrying system // Delft University of Technology, De Boeck Jan MSc, 2013. - 265 p.
10. Gunnar Tibert. Deployable Tensegrity Structures for Space Applications // Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Department of Mechanics, Stockholm, Sweden, 2002. – 220 p.
11. Landolf Rhode-Barbarigos, Nizar Bel Hadj Ali, Rene Motro, Ian F.C. Smith. Designing tensegrity modules for pedestrian bridges // Engineering Structures, Vol.32, No.4, 2010. - pp. 1158-1167.
12. Paradiso, S., Mucedola, M. Suspended bridge by Paradiso. - Electronic data. - 2015. - <http://tensegrity.wikispaces.com/Suspended+Bridge+by+Paradiso> (22.04.2015).
13. Kurilpa Bridge – a tensegrity world first. - Electronic data. - 2015. - http://www.oasysoftware.com/casestudies/casestudy/kurilpa_bridge_a_tensegrity_world_first (01.03.2015).