

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

2017, Том 4, №2 / 2017, Vol 4, No 2 <http://t-s.today/issues/vol4-no2.html>

URL статьи: <http://t-s.today/PDF/04TS217.pdf>

DOI: 10.15862/04TS217 (<http://dx.doi.org/10.15862/04TS217>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Буреев А.К. Применение принципа тенсегрити для создания мостовых конструкций. Часть 1. Общие сведения о системе «тенсегрити» // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», Том 4, №2 (2017) <http://t-s.today/PDF/04TS217.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/04TS217

For citation:

Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Bureev A.K. [Application of a tensegrity principle for creating bridge structures. Part 1. The "tensegrity" system overview] Russian journal of transport engineering, 2017, Vol. 4, no. 2. Available at: <http://t-s.today/PDF/04TS217.pdf> (In Russ.) DOI: 10.15862/04TS217

УДК 624.042

Овчинников Илья Игоревич

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Россия, Саратов¹
ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный университет (МАДИ)»
Филиал в г. Сочи, Россия, Сочи
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: bridgeart@mail.ru

Овчинников Игорь Георгиевич

Национально исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Балаковский инженерно-технологический институт (филиал), Россия, Балаково
ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Россия, Саратов
ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Россия, Пермь
Доктор технических наук, профессор
E-mail: bridgesar@mail.ru

Буреев Артем Константинович

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Россия, Саратов
Магистр
E-mail: artem.saratov2015@mail.ru

**Применение принципа тенсегрити
для создания мостовых конструкций. Часть 1.
Общие сведения о системе «тенсегрити»**

Аннотация. Рассматривается использование принципа самонапряженных конструкций «тенсегрити» в архитектуре и строительстве. Понятие тенсегрити характеризуется в архитектуре как совокупность взаимосвязанных элементов, работающих только на растяжение или сжатие. Термин «тенсегрити» образован из двух слов «tension» (растяжение) и «integrity» (целостность), то есть конструкции тенсегрити – это такие конструкции, целостность которых обеспечивается созданием предварительного растяжения элементов. Идею самонапряженных конструкций можно рассматривать как вид бионического подхода, т.е. способ использования созданных природой структур как прообраза для создания инженерных сооружений. В части 1 проанализированы основные свойства тенсегрити

¹ 410054, Саратов, Политехническая 77

структур, показаны их недостатки и отличительные особенности. Концепция конструкций «тенсегрити» определяется как совокупность принципов проектирования: нагруженные элементы находятся в состоянии 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; предварительное напряжение придает тросам жесткость при работе и на растяжение и на сжатие; конструкция обладает механической устойчивостью, позволяющей ее элементам оставаться в растянутом или сжатом состоянии даже при увеличении напряжений в элементах конструкции.

Ключевые слова: самонапряженные системы; тенсегрити; сжато-растянутые системы; архитектура тенсегрити систем; модули тенсегрити

Введение

В настоящее время у населения все больше и больше возрастает потребность в эстетике, в легких архитектурных формах, в надежных и красивых пешеходных переходах, мостах и т. д., как и в крупных мегаполисах, так и в небольших городах. Дизайн и архитектура не только олицетворяют «внешность» государства, но и формируют сознание нации, определяют уровень культуры населения. Данной проблеме уделяется в настоящее время много внимания в научных журналах, на конференциях и семинарах и т. д.

Инженерные сооружения, помимо основных своих функций, причем очень важных функций, оказывают на людей эстетическое влияние, которое может быть как позитивным, так и негативным. Мосты, в том числе и пешеходные, представляют собой особый вид и тип сооружений, архитектурный облик которых определяется в значительной степени конструкторской концепцией сооружения. В последнее время в мостостроении наблюдается тенденция передачи ведущей роли в проектировании архитектору. В этом есть доля вины инженеров-конструкторов и проектировщиков, которые долгие годы не уделяли внимания созданию гармоничного образа транспортного сооружения, а больше расчетам и анализу поведения сооружений. При немалой, а даже ключевой важности таких расчетов и анализов, пренебрежительное отношение к внешнему облику сооружения тоже недопустимо.

Многие проектные институты «грешат» использованием устаревших материалов, методик, нередко обращаются к типовым проектам и типовым конструктивным элементам. Это обусловлено рядом причин: во-первых, это болезненное отношение к нововведениям, а во-вторых – колоссальная экономия на стадии проектирования. В результате, появляются, возможно, и обладающие большим запасом прочности, но при этом эстетически скучные сооружения (рис. 1).



Рисунок 1. Один из «типовых» пешеходных мостов, возведенных в XX веке (фото авторов)
Figure 1. One of the "typical" pedestrian bridges erected in the XX century (the authors' photo)

Помимо этого, существует проблема и с устаревшей нормативной документацией, которая ограничивает проектировщиков не только в самих расчетах, но и в выборе форм, которые с успехом используются в других странах. Пока не существует и определенных документов, которые регламентировали бы эстетику мостовых сооружений.

Зачастую, инженер, проектирующий транспортное сооружение, осуществляет лишь его расчет и определяет размеры, в соответствии с концепцией, которую задал архитектор. Также бывает, что архитектор не участвует в разработке концепции сооружения. Часто работа инженера и архитектора, если она совместная, сводится к взаимным уступкам, так как каждый специалист считает именно свою задачу наиболее значимой.

Это противоречие можно преодолеть. При оценке эстетических качеств транспортного сооружения необходимо учитывать два момента:

- эстетика самого сооружения, как завершенной конструкции;
- соответствие внешнего облика сооружения окружающей среде.

Представление об инженерно-транспортном сооружении должно складываться, как об особом фрагменте истории, архитектуры и общественно-культурной среды.

Рациональное решение при проектировании транспортных сооружений может быть получено только тогда, когда в его создании участвуют компетентные инженеры-конструкторы, обладающие знаниями не только в расчетах, но и в архитектуре транспортных сооружений. А наиболее лучший результат получается, когда инженеры работают совместно с архитекторами.

Вопросы архитектуры мостовых сооружений рассматриваются в работах [1-26].

В современном мире в мостостроении практикуют применение четырех основных систем пролетных строений: балочная (ферменная), висячая, вантовая и арочная, а также комбинации этих систем.

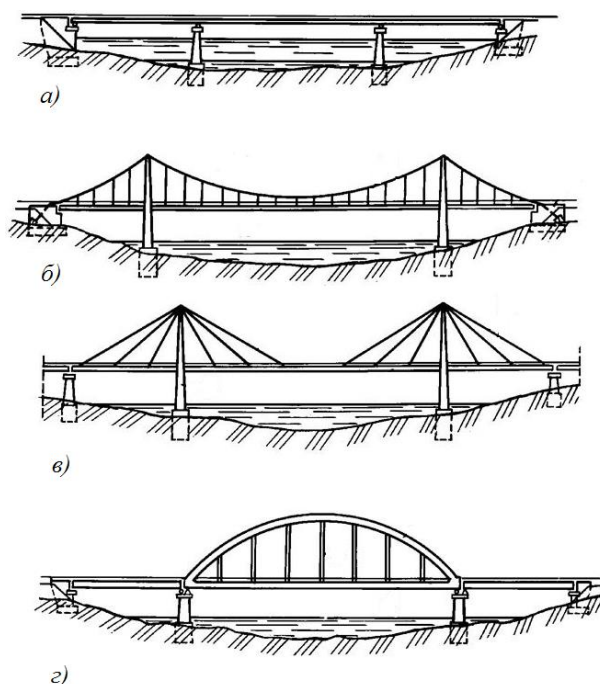


Рисунок 2. Известные типы пролетных строений, а) балочная система; б) висячая система; в) вантовая система; г) арочная система (рисунок авторов)

Figure 2. Known types of span structures, a) beam system; b) suspension system; c) cable system; d) arch system (the authors' picture)

При проектировании висячей или вантовой системы, конструкции сооружений разделяются на составные части: одни работают на сжатие (это пилоны и опоры), а другие на растяжение (это кабели, тросы и ванты).

Для повышения эффективности транспортных сооружений стоит обратить на такое новое направление в мостостроении, как самонапряженные системы, где часть элементов работает на сжатие за счет предварительного растяжения других элементов. Эта идея носит название «тенсегрити» и позволяет сооружать такие конструкции, которые позволяли бы полнее и эффективнее использовать их работу как пространственной системы (рис. 3) [27, 28, 30]. Система тенсегрити зарекомендовала себя с лучшей стороны, хотя является относительно молодой системой. Тенсегрити (англ. tensegrity от англ. tensional integrity – соединение путём натяжения) – это принцип геометрического построения конструкций, характеризующийся использованием элементов, которые одновременно работают и на растяжение и на сжатие. Термин «тенсегрити» предложен архитектором и ученым Ричардом Бакминстером Фуллером [27].



*Рисунок 3. Мост Курилпа Бридж (Брисбен, Австралия),
выполненный по системе «тенсегрити» [30]*

Figure 3. Kurilpa Bridge (Brisbane, Australia) made by the "tensegrity" system [30]

На сегодняшний день данная система применима пока что к пешеходным мостам [29].

1. Общие сведения о системе «тенсегрити»

Тенсегрити – это способность каркасных конструкций использовать взаимодействие работающих на сжатие цельных элементов с работающими на растяжение составными элементами для того, чтобы каждый элемент действовал с максимальной эффективностью и экономичностью (Р. Фуллер).

Также широко принято определение Рене Мотро, по которому система «тенсегрити» – это система, находящаяся в равновесном состоянии, и содержащая набор элементов, работающих на сжатие и растяжение.

1.1. Историческая справка.

Теория «тенсегрити» является относительно молодой, ей чуть более 50 лет. Однако знания об особенностях поведения конструкций «тенсегрити» и физических принципах их работы не очень распространены среди архитекторов, проектировщиков, строителей и инженеров, в том числе и тем более в сфере мостостроения. В связи с этим в течение последних двух-трех десятилетий множество конструкций и сооружений ложно квалифицировались как созданные по принципам «тенсегрити».

Истоки «тенсегрити» являются спорными. В 1948 году художник Кеннет Снелсон создал свой инновационный шедевр «X-Модуль» (рис. 4) после долгих художественных исследований в Black Mountain College, где Р. Фуллер читал лекции и в других учреждений.

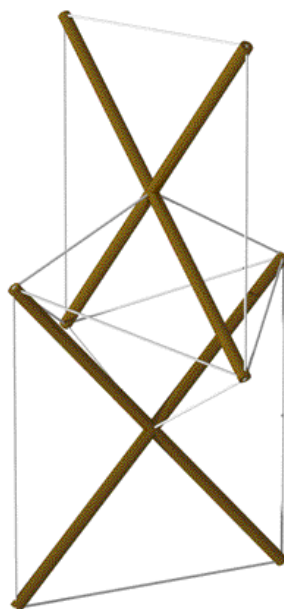


Рисунок 4. "X-Piece" – X-Модуль

Figure 4. "X-Piece" – X-Module

<http://www.wikiwand.com/en/Tensegrity>

Несколько лет спустя, термин «Тенсегрити» был предложен Фуллером, который был известен по «Геодезическому куполу», представленному на Всемирной выставке ЭКСПО-1967 в Монреале, Канада. Сооружение 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 (рис. 5). 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 [31].

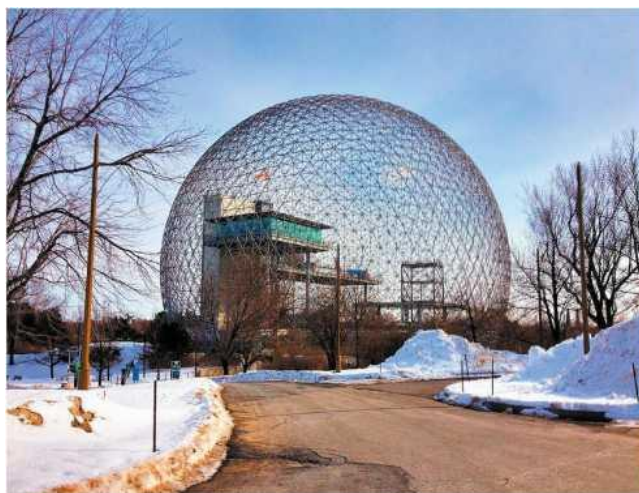


Рисунок 5. Геодезический купол
Figure 5. Geodesic dome

<http://www.concordia.ca/cuevents/finearts/art-history/2016/03/re-imagining-the-montreal-biosphere.html>

На протяжении всей своей карьеры, Фуллер экспериментировал, включая растягивающие компоненты в свои работы, например, в обрамлении его Дома «Димаксион» (рис. 6).



Рисунок 6. Дом «Димаксион»
Figure 6. "Dimaxion" House

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dymaxion_House_-_LOC_8c14945v.jpg

В 1949 году Фуллер, по поручению Снельсона, разработал икосаэдр на основе технологии «тенсегрити», и он и его ученики в дальнейшем развивали эту структуру, как прикладную для строительства куполов. После небольшого перерыва, Снельсон также продолжил производить различные скульптуры на основе концепций тенсегрити (рис. 7, 8). Основной этап работы Снельсона начался в 1959 году, когда состоялась «стержевая» выставка в Музее современного искусства.



Рисунок 7. Тенсегрити-модель – «Спящий дракон»
Figure 7. Tensegrity model – "The Sleeping Dragon"

<http://city-sentinel.com/2011/06/sleeping-dragon-sculpture-by-artist-kenneth-snelson-to-highlight-oklahoma-city%E2%80%99s-western-avenue/>



Рисунок 8. Модель тенсегрити К. Снельсона
Figure 8. Tensegrity model of Kenneth Snelson

http://alldayplus.ru/design_art_photo/culture/print:page,1,1549-napryazhennaya-celostnost-v-skulpturah-kenneta-snelsona.html

Также на этой выставке Фуллером были представлены мачты и некоторые другие работы. После этой выставки в экспозиции музея выставлялись и другие работы Фуллера и Снельсона.

Одной из самых известных работ Снельсона является его 18-метровая Игольчатая башня 1968 года (рис. 9).



Рисунок 9. Игольчатая башня К. Снельсона

Figure 9. Needle tower of Kenneth Snelson

<http://www.instructables.com/id/Desktop-Tensegrity-Tower/>

Будучи по образованию и профессии скульптором и фотографом, Снельсон избегал излишне глубоких математических и физических подходов во время создания проектов своих конструкций, полагаясь на свою интуицию, и при этом создавая конструкции самых различных конфигураций, ассиметричных, нетрадиционных, и хрупких на вид.

Русский художник Вячеслав Колейчук утверждал, что идея тенсегрити была впервые предложена Карлом Иогансоном, русским художником латышского происхождения, известным некоторыми работами русского конструктивизма в 1921 году. Снельсон признал тот факт, что конструктивисты влияли на его работу. Французский инженер Дэвид Джордж Эммерих также отметил, что работа Иогансона «предвидела» концепции тенсегрити. Его система «прототенсегрити» (с нем. Gleichgewichtkonstruktion) (рис. 10) представляла собой модуль, состоящий из трех распорок, семи тросов и еще одного троса, свободного от напряжений и служащего для внесения изменений в конфигурацию системы, и в то же время поддерживающего всю конструкцию в равновесии. Однако всё же считается, что изобретение Иогансона нельзя считать истинно конструкцией «тенсегрити», т. к. в элементах его модуля отсутствует предварительное напряжение, являющееся одной из основных характеристик конструкций «тенсегрити».

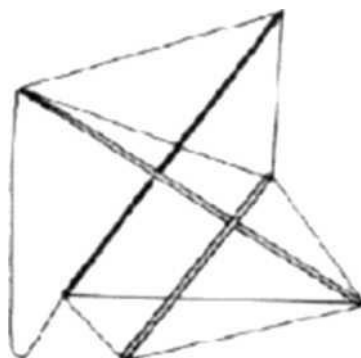


Рисунок 10. Модуль «прототенсегрити» Карла Йогансона
Figure 10. The "prototensegrity" module of Kārlis Johansons
<http://exparch-www.uibk.ac.at/index.php/Tensegrity>

По наиболее распространенной версии сразу несколько человек могут претендовать на роль первооткрывателя конструкций «тенсегрити»: Ричард Бакминстер Фуллер, Дэвид Джордж Эммерих и Кеннет Д. Снелсон. Каждый из них внес большой вклад в развитие идей «тенсегрити» и ее внедрение в сферу строительства. На рис. 11 изображены разработанные этими инженерами концепты модулей «тенсегрити», которые впоследствии легли в основу множества построенных конструкций и сооружений [31].

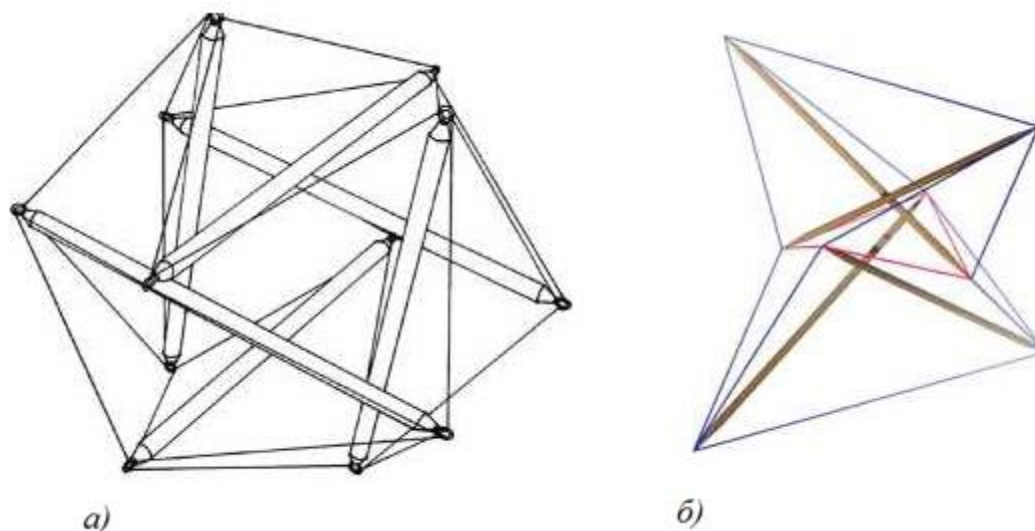


Рисунок 11. Примеры модулей «тенсегрити», где а) двадцатигранный модуль «тенсегрити» Б. Фуллера (1949 г.); б) X-образный модуль «тенсегрити» К. Снелсона (1959 г.)
Figure 11. Examples of "tensegrity" modules, where a) icosahedral "tensegrity" module of B. Fuller (1949); b) X-shaped "tensegrity" module of K. Snelson (1959)
<http://conductual.com/content/multiscaled-approach-privacy>,
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tensegrity_X-Module_Tetrahedron.png

Также стоит отметить самую высокую башню (мачту) «тенсегрити», построенную когда-либо в мире. Башня Уорноу имеет высоту 62,3 м (49,2 м основная часть плюс 12,5 м стальная стрела) и диаметр 5 м. Башня была возведена в 2003 г. к выставке в г. Росток, ФРГ. Конструкция башни состоит из шести Т-образных призм, сконструированных из трех распорок (рис. 12). Каждая призма имеет в высоту 8,3 м и состоит из трех стальных распорок-труб, работающих на сжатие, трех диагональных и трех горизонтальных тросов, работающих на растяжение.

Башня Уорноу постоянно подвергается воздействию сильных ветровых нагрузок, учитывая близость нахождения Балтийского моря. Инженеры добавили специальный узел для стыка стержней, позволяющий увеличить предварительное напряжение в элементах конструкции башни. Также для устройства тросов использовались технологии, используемые в вантовых и подвесных мостах.



*Рисунок 12. Башня Уорноу, где а) общий вид;
б) крупный план соединения двух Т-образных призм*

Figure 12. Tower of Warnow, where a) general view; b) close-up of joint of two T-shaped prisms:
<http://www.sbp.de/presse/publikationen-archiv/>

Таким образом, можно сделать вывод, что конструкции «тенсегрити» имеют довольно широкий диапазон применения, начиная от игрушечных изделий и скульптур и заканчивая довольно значительными по размерам сооружениями.

1.2. Области применения систем тенсегрити

Познания Р.Б. Фуллера в проектировании геодезических куполов позволили частично внедрить идею тенсегрити в инженерное проектирование.

Купольные сооружения представляют собой оболочки сетчатой структуры, несущая способность которых обеспечивается за счет грамотного распределения нагрузки на множественные элементы структуры. Благодаря исследованиям Фуллера показаны основные положительные характеристики подобных сооружений:

- большая несущая способность (увеличивающаяся вместе с увеличением элементов и, как следствие, размера конструкции);
- удобная сборка (без крана);
- уникальная аэродинамическая форма, позволяющая использовать строения в ветреных районах.

Изобретения Фуллера на основе принципа самонапряженных конструкций и по сей день с успехом применяются в жизни: оболочки, купольные дома, временные сооружения-палатки.

Другие сферы применения конструкций тенсегрити:

- аэрокосмическая инженерия: телескопические мачты, антенны, панели солнечных батарей и др. Одним из основных критериев выбора именно такого рода конструкций была возможность быстрого развертывания в особенных условиях и ограниченном пространстве. В этом случае наиболее полно проявляются такие свойства тенсегрити как необходимая жесткость, структурная эффективность и размерная точность;
- системы остекления: каркас подобной конструкции позволил создать закрытую систему с хорошими акустическими свойствами. Помимо этого, данная концепция позволила снизить материалоемкость конструкции без существенной потери прочностных свойств;
- биоинженерия: учитывается природный характер тенсегрити структур и др.

Система «тенсегрити» применима не только в строительстве и скульптуре, но также и в биологии. Биотенсегрити – термин, введенный доктором Стивеном Левином, означает применение принципов «тенсегрити» для биологических структур, таких как мышцы, кости, фасции, связки и сухожилия, а также жестких и эластичных мембран клеток. Мышечно-скелетная система представляет собой синергию мышц и костей. Мышцы и соединительные ткани обеспечивают непрерывное растяжение, а кости – сжатие (рис. 13).

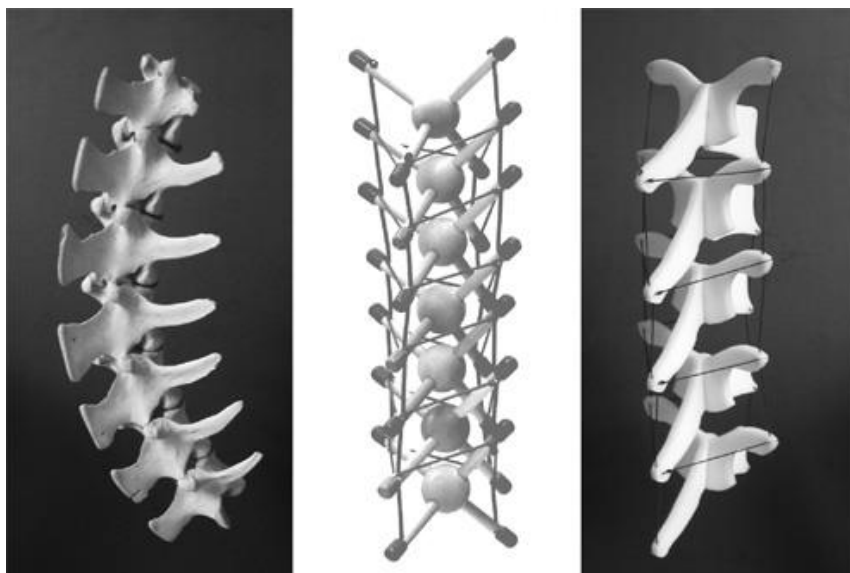


Рисунок 13 Система «тенсегрити» в биологии

Figure 13. The "tensegrity" system in biology

<http://rsif.royalsocietypublishing.org/content/11/98/20140520>

Теория «тенсегрити» применима также и в области молекулярной биологии, для клеточной структуры она была разработана врачом и ученым Дональдом Ингбером. Кроме того, геометрические узоры, найденные в природе (например, спирали ДНК) могут также быть основанными на применении принципов тенсегрити.

1.3. Особенности системы «тенсегрити»

Конструкции «тенсегрити» – это самонапряженные устойчивые пространственные системы, находящиеся в равновесном состоянии под действием внешних нагрузок. Конструкции «тенсегрити» состоят из дискретных сжатых элементов – стоек или распорок, а также вант или тросов, натянутых таким образом, чтобы сжатые элементы не соприкасались друг с другом. 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 [29].

Концепцию конструкций «тенсегрити» можно определить как совокупность нескольких простых принципов проектирования:

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

Говоря о достоинствах конструкций системы «тенсегрити», можно выделить:

- лёгкость конструкций;
- эффективное использование элементов системы;
- устойчивость сооружения к внешним воздействиям;
- возможность включения в работу дополнительных элементов для увеличения жесткости конструкции;
- высокая транспортабельность элементов и удобство монтажа.

Недостатки у данной конструкции тоже имеются, а именно:

- возможность работы данной конструкции только под относительно невысокими нагрузками;
- необходимость обязательного предварительного напряжения;
- специфические аэродинамические свойства;
- отсутствие нормативной документации, регламентирующей проектирование и монтаж конструкций данной системы.

Благодаря модульной структуре, система «тенсегрити» имеет большое количество потенциальных структур. Это показано на рис. 14.

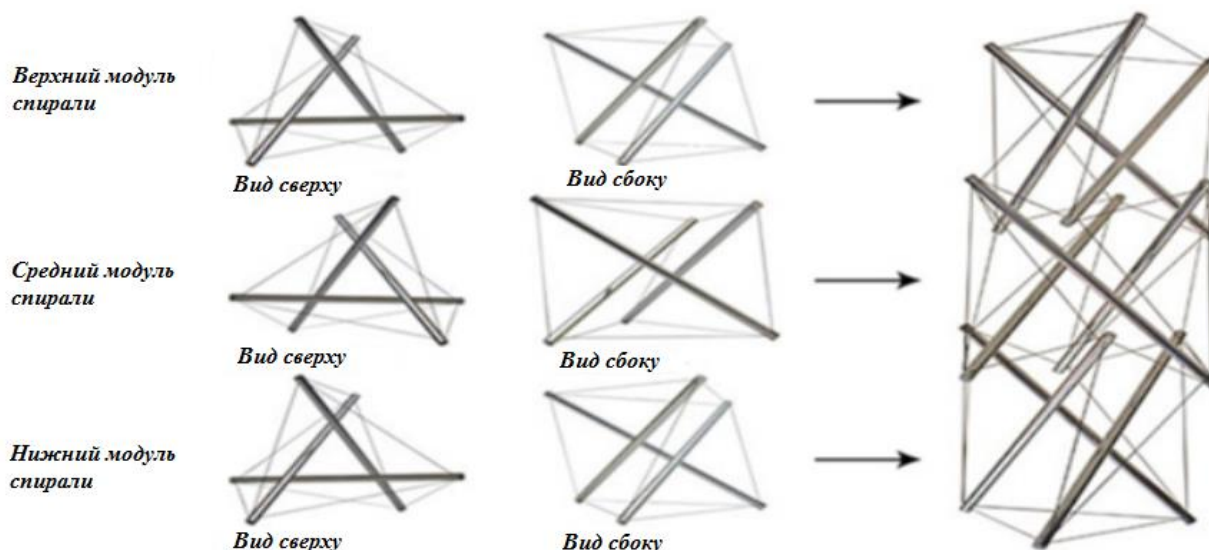


Рисунок 14. Преобразование моделей «тенсегрити» (трёхрёберных призм) в единую конструкцию по типу спирали [27]

Figure 14. Transformation of the "tensegrity" models (tricostate prisms) into a single structure according to the type of spiral [27]

1.4. Модули тенсегрити

Разработка структурно эффективных систем тенсегрити включает в себя в первую очередь выбор и создание наиболее подходящих и структурно эффективных составных частей-модулей. Из наиболее полезных свойств модулей следует отметить эффективность в системе, которая во многом зависит от геометрических характеристик (пространственной формы), возможность создания комбинации с другими модулями системы, возможность регулировки характеристик элементов конструкции. Проектирование систем тенсегрити довольно сложный процесс, требующий индивидуального подхода и внедрения неординарных решений. Любая самонапряженная конструкция проектируется в зависимости от определенных свойств потенциального объекта, при этом довольно эффективными составляющими можно считать элементы на основе стандартных геометрических фигур. Рассмотрим их подробнее. На рис. 15 приведены жесткие элементы потенциальных тенсегрити-структур.

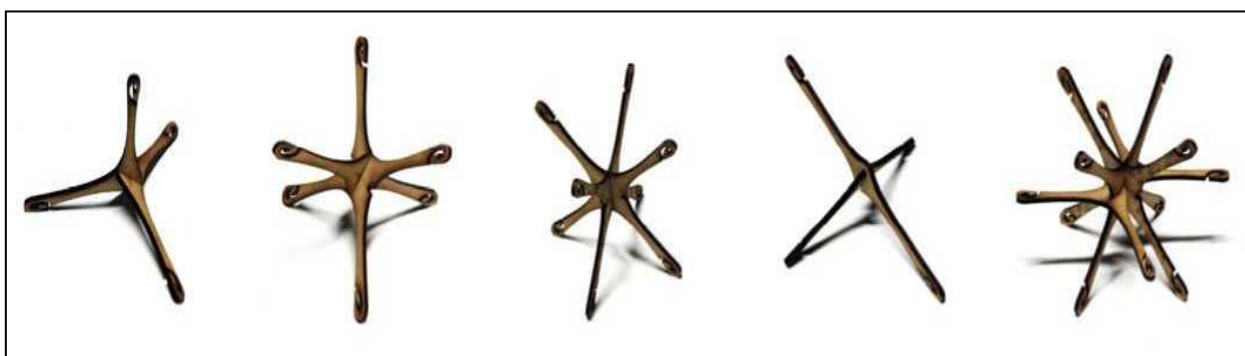


Рисунок 15. Стандартные модули с определенным числом вершин [32]

Figure 15. Standard modules with a certain number of vertices [32]

Тетраэдр в качестве элемента тенсегрити зарекомендовал себя в конструировании башен, в которых вертикальные соединения (тросы) элементов позволяют конструировать

усиленную систему, устойчивую к горизонтальным отклонениям. Корректируя длину тросов можно генерировать разнообразные формы с ограниченным числом модулей [33].

Кубооктаэдр, как элемент тенсегрити можно использовать в качестве универсального модуля, т. к. 12 вершин фигуры позволяют расширять систему в различных направлениях, посредством 6-ти соединений на вершинах (рис. 16).

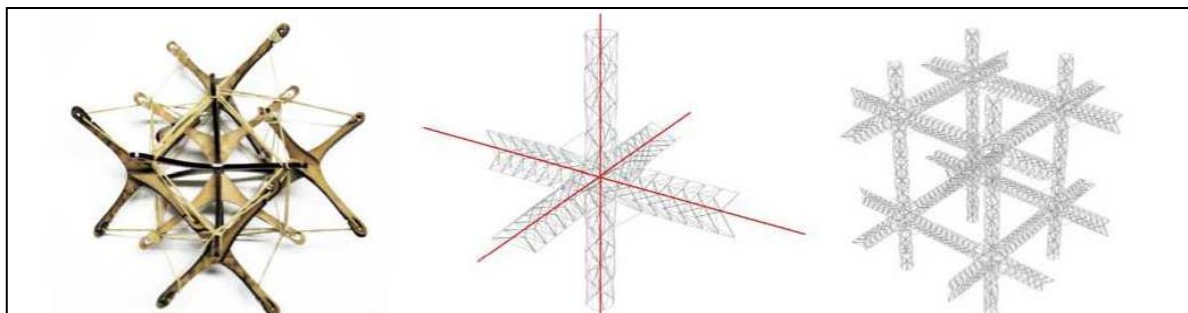


Рисунок 16. Преобразование фигур тенсегрити посредством соединения элементов по осям: X, Y, Z [32]

Figure 16. Transformation of tensegrity figures by joining elements along the axes: X, Y, Z [32]

В качестве простейшего примера использования базовых геометрических фигур можно привести преобразованный тетраэдр (без 2-х граней) (рис. 17).

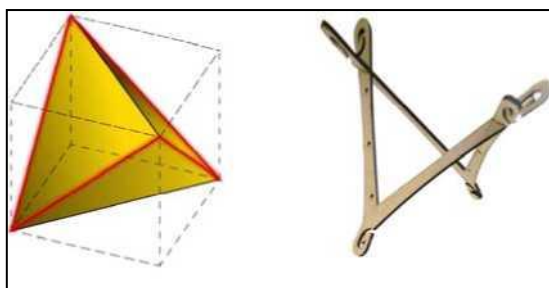


Рисунок 17. Преобразованный модуль [32]

Figure 17. A transformed module [32]

На рис. 18 продемонстрирована модель потенциального пролетного строения мостового сооружения, разработанная исследовательской группой Королевского Технического института Мельбурна (Австралия). Конструкция скомбинирована из идентичных элементов по типу преобразованного тетраэдра. Данная конструкция благодаря взаимному натяжению препятствует скручиванию элементов системы и изгибам пролетного строения. При этом также обеспечивается свободное необходимое пространство в конструкции.



Рисунок 18. Единая самонапряженная конструкция [32]

Figure 18. A single self-stressed structure [32]

Заключение

В части 1 работы рассмотрено понятие самоняпряженных систем, носящих название «тенсегрити», приведены общие сведения о системе «тенсегрити», кратко освещена история появления систем «тенсегрити», рассмотрены области применения систем тенсегрити и особенности этих систем. В завершение рассмотрены основные типы модулей «тенсегрити».

ЛИТЕРАТУРА

1. Щусев П.В. Мосты и их архитектура. М. Стройиздат. 1952. 360 с.
2. Надежин Б.М. Мосты и путепроводы в городах. М. Стройиздат. 1964. 288 с.
3. Пунин, А.Л. Архитектура современных зарубежных мостов / А.Л. Пунин. – Л.: Стройиздат, 1974. – 73 с.
4. Пунин А.Л. Синтез искусств в архитектуре мостов // Строительство и архитектура Ленинграда, 1975, № 6. – С. 32-35.
5. Айрапетов Д.П. Материал и архитектура. – М.: Стройиздат, 1978. – 270 с.
6. Толмачев, К.Х. Основы архитектурного проектирования мостов / К.Х. Толмачев. – Новосибирск, 1978. – 62 с.
7. Пунин А.Л. Архитектура отечественных мостов. Л. Стройиздат. 1982. 152 с.
8. Гибшман Е.М. Архитектурное проектирование мостовых сооружений. М.: МАДИ, 1988. – 87 с.
9. Надежин Б.М. Архитектура мостов. М. Стройиздат. 1989. 95 с.
10. Менн К. Эстетические критерии в проектировании мостов//Мостостроение мира, 1997, № 2. – С. 28-31.
11. Вирложе М. Конструктивное и архитектурное проектирование мостов, инженер-консультант // Мостостроение мира, 1997, № 2. – С. 14-19.
12. Уолтер Р. Роль инженеров и архитекторов в проектировании мостов // Мостостроение мира, 1997, № 2. – С. 9-13.
13. Леонгардт Ф. Значение эстетики в конструкциях мостов // Мостостроение мира, 1997, № 2. – С. 4-8.
14. Шимко В.Т., Шербина С.К. Современный мост как произведение средового искусства // Вестник мостостроения, 1998, № 3-4. – С. 14-22.
15. Пунин А.Л. Эстетические проблемы мостостроения: история и современность // Вестник мостостроения, 1998, № 3-4. – С. 5-12.
16. Ростам С. Эстетика и функциональные возможности мостов // Вестник мостостроения, 1998, № 3-4. – С. 23-27.
17. Овчинников И.Г., Инамов Р.Р., Бахтин С.А., Овчинников И.И. Висячие и вантовые мосты. Эстетические проблемы. Саратов. СГТУ. 2002. 108 с.
18. Ефимов П.П. Архитектура мостов. – Омск: ГУИПП Омский дом печати, 2002. – 288 с.
19. Ефимов П.П. Архитектура мостов. М. ФГУП Информавтодор. 2003. 296 с.

20. Овчинников И.Г., Дядченко Г.С. Пешеходные мосты: конструкции, строительство, архитектура. Саратов. СГТУ. 2005. 227 с.
21. Leonhardt, F., Bridges: Aesthetics and Design, Deutsche Verlags-Anstalt (MIT Press, Cambridge, Massachusetts), 1982. 308 pp.
22. Billington, D.P., The Tower and the Bridge, Basic Books, New York, New York, 1983. 306 pp.
23. Aesthetic guidelines for bridge design. Minnesota department of transportation. Office of bridges and structures. 1995. 89 pp.
24. Camberlin W., History of preservation practices for highway bridges, NCHRP Symp. 1999. Nb 275, 58 p.
25. Aesthetic bridges. Users guide. Maryland Department of Transportation State Highway Administration. Office of Bridge Development. August, 1993. Revised, January 2005. 244 pp.
26. Bridge Aesthetics Sourcebook. Practical Ideas for Short and Medium Span Bridges. Draft, March 2009. 72 pp.
27. Буреев А.К., Овчинников И.И., Овчинников И.Г. Применение структур тенсегрити в архитектуре и мостостроении // Новые идеи нового века – 2016: материалы Шестнадцатой Международной научной конференции = The new Ideas of New Century – 2016: The Fifteenth International Scientific Conference Proceedings: в 3 т. / Тихоокеан. гос. ун-т. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. – 3 т. ISBN 978-5-7389-1894-0. Т. 3. – 404 с. с. 200-206.
28. Буреев А.К., Овчинников И.Г. Методы поиска форм тенсегрити-структур // Сборник материалов XVIII Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства, строительной индустрии и промышленности», Тула, (29-30 июня 2017 г.) с. 36-41.
29. Овчинников И.Г., Кокодеев А.В. Исследование возможностей применения самонапряженных конструкций (тенсегрити) при создании транспортных сооружений // Инновации и исследования в транспортном комплексе. Материалы III Международной научно-практической конференции. Часть I (в двух частях) – Курган, 2015. – 384 с. с. 134-141.
30. 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.
31. Valentin G. Jauregui. Tensegrity Structures and their Application to Architecture // School of Architecture Queen's University Belfast, September, 2004-239 p.
32. Tensegrity structures with 3D compression members: development, assembly and Design // Article in Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures 50(2): January 2009. p. 99-110.
33. Motro R. Tensegrity: structural systems for the future // Kogan Page Science, U.K., 2003. – 19 p.

Ovchinnikov Ilya Igorevich

Yuri Gagarin state technical university of Saratov, Russia, Saratov
Moscow state automobile & road technical university
Sochi branch, Russia, Sochi
E-mail: bridgeart@mail.ru

Ovchinnikov Igor Georgievich

National research nuclear university Moscow engineering physics institute
Balakovo institute of engineering and technology (branch), Russia, Balakovo
Yuri Gagarin state technical university of Saratov, Russia, Saratov
Perm national research polytechnic university, Russia, Perm
E-mail: bridgesar@mail.ru

Bureev Artem Konstantinovich

Yuri Gagarin state technical university of Saratov, Russia, Saratov
E-mail: artem.saratov2015@mail.ru

Application of a tensegrity principle for creating bridge structures. Part 1. The "tensegrity" system overview

Abstract. The use of a principle of the self-stressed "tensegrity" structures in architecture and construction is considered in this article. The concept of tensegrity is characterized in architecture as a set of interrelated elements that work only on tension or compression. The term "tensegrity" is formed from two words "tension" and "integrity", that is, the tensegrity constructions are such ones, integrity of which is provided by the creation of initial tension of the elements. The idea of the self-stressed constructions can be considered as a kind of bionic approach, i.e. the way of using structures created by nature as a prototype for making engineering structures. In Part 1, the authors analyzed the main properties of tensegrity structures and showed their disadvantages and distinctive features. The concept of "tensegrity" constructions is defined as a set of design principles: the stressed elements are in a state of either pure compression or pure tension. That is to say that the structure consisting of these elements can collapse either as a result of cable break or due to bar buckling. The pretension stiffens the ropes during behavior both in tension and in compression. The design has a mechanical stability, allowing its elements to remain in a tensioned or compressed state, even with increasing stresses in the elements of the structure.

Keywords: self-stressed systems; tensegrity; compressed-tensioned systems; architecture of tensegrity systems; tensegrity modules

REFERENCES

1. Schusev P.V. (1952). *Mosty i ih arhitektura. [Bridges and their architecture.]* Moscow: Stroyizdat, p. 360.
2. Nadezhin B.M. (1964). *Mosty i puteprovody v gorodah. [Bridges and overpasses in cities.]* Moscow: Stroyizdat, p. 288.
3. Punin A.L. (1974). *Arhitektura sovremennyh zarubezhnyh mostov. [Architecture of modern foreign bridges.]* Leningrad: Stroyizdat, p. 73.
4. Punin A.L. (1975). Synthesis of arts in bridge architecture. *Building and architecture of Leningrad*, 6, pp. 32-35. (in Russian).

5. Ajrapetov D.P. (1978). Material i arhitektura. [*Material and architecture.*] Moscow: Stroyizdat, p. 270.
6. Tolmachev K.H. (1978). Osnovy arhitekturnogo proektirovaniya mostov. [*Basics of architectural design of bridges.*] Novosibirsk, p. 62.
7. Punin A.L. (1982). Arhitektura otechestvennyh mostov. [*Architecture of domestic bridges.*] Leningrad: Stroyizdat, p. 152.
8. Gibshman E.M. (1988). Arhitekturnoe proektirovanie mostovyh sooruzhenij. [*Architectural design of bridge structures.*] Moscow: MADI, p. 87.
9. Nadezhin B.M. (1989). Arhitektura mostov. [*Bridge architecture.*] Moscow: Stroyizdat, p. 95.
10. Menn K. (1997). Aesthetic criteria in the design of bridges. *Bridge construction of the world*, 2, pp. 28-31. (in Russian).
11. Virlozhe M. (1997). Constructive and architectural design of bridges, engineer-consultant. *Bridge construction of the world*, 2, pp. 14-19. (in Russian).
12. Uolter R. (1997). The role of engineers and architects in the design of bridges. *Bridge construction of the world*, 2, pp. 9-13. (in Russian).
13. Leongardt F. (1997). The importance of aesthetics in the construction of bridges. *Bridge construction of the world*, 2, pp. 4-8. (in Russian).
14. Shimko V.T., Sherbina S.K. (1998). Modern bridge as a product of environmental art. *Bulletin of bridge construction*, 3-4, pp. 14-22. (in Russian).
15. Punin A.L. (1998). Aesthetic problems of bridge construction: history and modernity. *Bulletin of bridge construction*, 3-4, pp. 5-12. (in Russian).
16. Rostam S. (1998). Aesthetics and functionality of bridges. *Bulletin of bridge construction*, 3-4, pp. 23-27. (in Russian).
17. Ovchinnikov I.G., Inamov R.R., Bahtin S.A., Ovchinnikov I.I. (2002). Visjachie i vantovye mosty. `Esteticheskie problemy. [*Hanging and cable-stayed bridges. Aesthetic problems.*] Saratov: SGTU, p. 108.
18. Efimov P.P. (2002). Arhitektura mostov. [*Bridge architecture.*] Omsk: GUIPP Omsk House of Printing, p. 288.
19. Efimov P.P. (2003). Arhitektura mostov. [*Bridge architecture.*] Moscow: FGUP Informavtodor, p. 296.
20. Ovchinnikov I.G., Djadchenko G.S. (2005). Peshehodnye mosty: konstruksii, stroitel'stvo, arhitektura. [*Pedestrian bridges: structures, construction, architecture.*] Saratov: SGTU, p. 227.
21. Leonhardt F. (1982). *Bridges: Aesthetics and Design*, Deutsche Verlags-Anstalt. Massachusetts: MIT Press, Cambridge, p. 308.
22. Billington D.P. (1983). *The Tower and the Bridge*, Basic Books. New York, p. 306.
23. (1995). Aesthetic guidelines for bridge design. Minnesota department of transportation. *Office of bridges and structures*, p. 89.
24. Camberlin W. (1999). History of preservation practices for highway bridges. *NCHRP Symp.*, 275, p. 58.

25. (2005). Aesthetic bridges. Users guide. Maryland Department of Transportation State Highway Administration. Office of Bridge Development, p. 244.
26. (2009). Bridge Aesthetics Sourcebook. Practical Ideas for Short and Medium Span Bridges, p. 72.
27. Bureev A.K., Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G. (2015). Primenenie struktur tensegriti v arhitekture i mostostroenii. [*Application of Tensegrity structures in architecture and bridge construction.*] Khabarovsk: Publishing house Pacific. state. University, p. 404.
28. Bureev A.K., Ovchinnikov I.G. (2017). Methods of searching for forms of Tensegrity structures. *Collection of materials of the XVIII International Scientific and Technical Conference "Actual problems of construction, construction industry and industry"*, pp. 36-41. (in Russian).
29. Ovchinnikov I.G., Kokodeev A.V. (2015). Study of the possibilities of using self-stressed structures (tensegrity) in the creation of transport structures. *Innovations and research in the transport complex. Materials of the III International Scientific and Practical Conference*, 1, pp. 134-141. (in Russian).
30. Kokodeev A.V., Ovchinnikov I.G. (2015). Analysis of the constructive solution of the largest bridge – "Tensegrity" Kurilp Bridge. *Naukovedenie*, [online] 4(7). Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/40TVN415.pdf> (in Russian). DOI 10.15862/40TVN415.
31. Valentin G.Ja. (2004). Tensegrity Structures and their Application to Architecture. *School of Architecture Queen's University Belfast*, p. 239.
32. (2009). Tensegrity structures with 3D compression members: development, assembly and Design. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 50(2), pp. 99-110.
33. Motro R. (2003). Tensegrity: structural systems for the future. *Kogan Page Science*, p. 19.