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

2017, Том 4, №3 / 2017, Vol 4, No 3 <http://t-s.today/issues/vol4-no3.html>

URL статьи: <http://t-s.today/PDF/01TS317.pdf>

DOI: 10.15862/01TS317 (<http://dx.doi.org/10.15862/01TS317>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Буреов А.К. Применение принципа тенсегрити для создания мостовых конструкций. Часть 2. Примеры мостов-тенсегрити // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», Том 4, №3 (2017) <http://t-s.today/PDF/01TS317.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/01TS317

For citation:

Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Bureev A.K. [Application of a tensegrity principle for creating bridge structures. Part 2. The "tensegrity" system overview] Russian journal of transport engineering, 2017, Vol. 4, no. 3. Available at: <http://t-s.today/PDF/01TS317.pdf> (In Russ.) DOI: 10.15862/01TS317

УДК 624.042

Овчинников Илья Игоревич

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

Буреов 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 2. Примеры мостов-тенсегрити

Аннотация. В работе рассмотрены математические характеристики моделей тенсегрити систем – самонапряженных конструкций, состоящих из элементов, работающих в условиях либо чистого сжатия (распорки), либо чистого растяжения (тросы). Кратко рассмотрены вопросы определения подходящей геометрической конфигурации тенсегрити – структур, обеспечивающей наименьшие усилия в элементах, а также вопросы динамического поведения тенсегрити – систем. Далее в работе рассмотрены примеры существующих мостовых сооружений, созданных с использованием тенсегрити – систем. В частности, рассмотрены: мост Курилла в Брисбене (Австралия), мачтовый мост в Пюрмеренде (Нидерланды), велосипедно – пешеходный мост в Алмере (Нидерланды), Мост Королевы

¹ 410054, Саратов, Политехническая 77

Виктории в доках Лондона, пешеходный мост в Стерлинге (Шотландия). В заключительной части работы рассмотрены проекты мостов – тенсегрити: пешеходный мост по типу тенсегрити, разработанный научно-исследовательской группой Римского университета; пешеходный мост из четырех модулей тенсегрити систем, разработанный научно – исследовательской группой Федерального технического института в Лозанне (Швейцария); проект пешеходного перехода между зданиями из симплекс – модулей; проект бамбукового моста по типу тенсегрити, изготавливаемый из бамбука и стали и способный выдерживать нагрузку, превышающую собственный вес в 60 раз; проект пешеходного подвесного моста – тенсегрити через реку Сезия (Италия).

Ключевые слова: самонапряженные системы; тенсегрити; сжато-растянутые системы; архитектура тенсегрити систем; модули тенсегрити; математические характеристики модулей тенсегрити; пешеходные мосты – тенсегрити

Введение

В первой части настоящей работы [1] рассматривались общие вопросы применения 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. Были проанализированы основные свойства тенсегрити структур, показаны их недостатки и отличительные особенности. Концепция конструкций «тенсегрити» определяется как совокупность следующих 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. Отдельным вопросам применения систем тенсегрити посвящены работы российских авторов [2-5]. Во второй части данной статьи будут рассмотрены математические характеристики элементов тенсегрити систем и вопросы применения систем тенсегрити в мостостроении.

Математические характеристики моделей тенсегрити

Правильное и эффективное функционирование конструктивной системы тенсегрити обеспечивается совокупностью математических и физических характеристик элементов будущей конструкции. Одним из наиболее сложных шагов в проектировании элементов тенсегрити является определение необходимых физических характеристик элементов и их расположения в пространстве, а также связь друг с другом. Без учета этих факторов обеспечение состояния равновесия и жесткости элементов, состояния необходимого как для традиционных конструкций, так и для мостовых сооружений, невозможно. На примере исследований инженера Лэндольфа Рода-Барбаригоса [6] в его проекте пешеходного моста в Швейцарии можно описать базовые математические характеристики будущих модулей самонапряженных систем.

Структурная эффективность элементов (модулей) конструкции определяет поведение системы в целом и поэтому некоторым преимуществом обладают традиционные геометрические элементы, структура которых позволяет создавать необходимые комбинации фигур с множеством связей.

Ключевым шагом в проектировании тенсегрити структур является определение подходящей геометрической конфигурации, важнейшим свойством которой будет состояние равновесия. Данный шаг называют формой поиска или проблемой предварительного напряжения. Самонапряженное состояние определяется из уравнения равновесия:

$$[A]\{f\} = \{0\}, \quad (1)$$

где: A – матрица равновесия, f – вектор силы.

Матрица равновесия зависит от геометрических параметров системы. Распорки систем тенсегрити работают только на сжатие, а соединительные тросы только на растяжение. В результате получается самоуравновешенная стабильная и самонапряженная конструкция. Число самонапряженных форм (элементов) в системе определяется по формуле:

$$s = b - r_a, \quad (2)$$

где: b – число элементов системы, r_a – ранг матрицы равновесия. Предполагается, что системы тенсегрити являются жесткими структурами, несмотря на неподчинение принципу Максвелла. Согласно этому принципу жесткий каркас (модуль) с j -ым количеством узловых точек требует $3j-6$ элементов, где 6 – число удерживающих связей. В этом случае должны быть выполнены некоторые условия. Жесткость таких элементов на порядок ниже из-за ничтожно малого количества частей. Конечные элементы описывают перемещения без изменения расстояния. Бесконечно малые механизмы предполагают более малый отрезок узлового перемещения. Характерный пример бесконечно малой структуры показан на рис. 1.

Рисунок 1. Бесконечно малый элемент

Figure 1. An infinitely small element

https://infoscience.epfl.ch/record/180643/files/EPFL_TH5457.pdf

На рис. 1 показано, что изменение длины элемента Δl меньше, чем величина вертикального узлового перемещения δ .

Используя матрично-алгебраическую основу с принципом Максвелла можно изучить самонапряженные элементы и модули в системе тенсегрити. Число внутренних элементов в сетчатой структуре определяется по формуле:

$$m = N - r_a, \quad (3)$$

где: N – число степеней свободы, а r_a – ранг матрицы равновесия.

Структура с ничтожно малыми элементами кинематически неопределима, т. к. их геометрия не выражена. Таким образом, структуры тенсегрити – это статически и кинематически неопределимые шарнирные фермы в самонапряженном состоянии, которые могут содержать бесконечное число элементов. Инженерами-исследователями был проведен матричный анализ статически и кинематически неопределимых конструкций, а также найдены численные решения. На основе этого были изучены предварительно напряженные и самонапряженные структуры. Проблемы поиска форм тенсегрити-элементов были изучены позже. С целью совершенствования конструкций тенсегрити было предложено использовать эластичные соединения и жесткие распорки. С математической точки зрения поведение систем тенсегрити описывается нелинейными уравнениями и неравенствами, которые используются для описания натяжения в тросах элементов.

В 2003 году Кеннетом Снелсоном была разработана обобщенная методика подбора самонапряженных модулей, предполагающая уменьшение необходимых условий. Также были проработаны проблемы обеспечения симметрии тенсегрити структур с учетом набора ограничений. В 2009 году была представлена новая форма уравнений равновесия для непрерывных кабелей. В дальнейшем был предложен так называемый метод удельных усилий, преобразующий нелинейные уравнения в линейные на основе соотношения между нормальными силами и расчетными длинами элементов [6]. Уравнения равновесия для конфигураций структур тенсегрити с непрерывными соединительными кабелями были представлены как общие классические уравнения для тенсегрити структур. Таким образом, формулировка уравнений применима для всех типов тросов. При этом непрерывность тросов изменяет тенсегрити – механику, уравнивая внутренние усилия, вследствие чего кинематические ограничения сокращаются. Обобщенная матрица равновесия определяется по формуле:

$$\bar{A} = C \tilde{g} \tilde{l}^{-1} S^t \bar{l}, \quad (4)$$

где: C – матрица идентичности, $\bar{l}$ – длина проекции элемента в каждом направлении декартовой системы координат, S^t – кластерная матрица, $\tilde{l}$ – длина элемента, $\tilde{g}$ тильда-диагональ матрицы. Групповая (кластерная) матрица связывает характеристики соединительных тросов [6].

Численные методы в определении конфигураций тенсегрити реализуются как при аналитическом исследовании, так и при стохастическом поиске формы модуля. Также для самонапряженных структур можно применять так называемый метод динамического ослабления (релаксации) [6, 7].

Метод динамической релаксации представляет собой итерационный подход для нахождения статического равновесия структуры. Фиктивная динамическая модель используется для отслеживания движения конструкции с момента нагрузки (натяжения) до состояния статического равновесия при затухании колебаний. При использовании метода динамической релаксации для конструкций тенсегрити, элементы структуры считаются геометрически линейными, и все нагрузки считаются приложенными к узлам. Метод исследует равновесие на основе уравнения перемещений:

$$M\ddot{u} + D\dot{u} + F_{int} = F_{ext}, \quad (5)$$

где: $\ddot{u}$ и $\dot{u}$ векторы производных от узловых перемещений (узлового ускорения и скорости), M – матрица массы; D – матрица демпфирования; F_{int} – вектор внутренних усилий, F_{ext} – вектор внешних сил. Даже с учетом использования уравнений перемещений метод

релаксации остается статическим. Статическое решение рассматривают как результат наступившего равновесия при затухании колебаний. Следовательно, уравнение (5) описывает равновесие при нулевых значениях перемещений. Кинетическое демпфирование может быть использовано для того, чтобы уменьшить время вычислений и улучшить сходимость. Кинетическая энергия рассчитывается из векторов скоростей на каждый момент времени. При максимальной кинетической энергии узловые перемещения равны нулю. Таким образом, расчет продолжается до достижения равновесия при приближении величин векторов перемещений к нулю. В результате статический анализ превращается в, своего рода, псевдо-динамический анализ. Характеристики матриц массы и демпфирования, а также времени подбираются для быстрого сокращения и возможности статического расчета. Данный метод вычисления достаточно быстрый, ввиду того, что не требуется матрица жесткости.

Динамические характеристики моделей тенсегрити

Тенсегрити структуры образуют легкие конструкции, которые чувствительны к вибрациям. Первые численные исследования экспериментального динамического поведения тенсегрити систем показали [6], что линеаризованная динамическая модель хорошо приближает нелинейное поведение системы тенсегрити к равновесному состоянию. Линеаризованное уравнение перемещений имеет вид:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [KT]\{u\} = \{F\}, \quad (6)$$

где: $[M]$ – матрица масс, $[KT]$ – тангенциальная матрица жесткости, $\{u\}$ и $\{\ddot{u}\}$ соответственно векторы узловых перемещений и ускорений, $\{F\}$ – вектор приложенной нагрузки.

Нелинейный динамический анализ систем тенсегрити требует вывода нелинейного уравнения движения по образцу тенсегрити структур, с учетом того, что кабели (без учета массы) – это гибкие элементы, а распорки – жесткие. Это предположение приводит к более точной математической модели уравнения движения по сравнению с другими гибкими структурами.

Также были изучены вибрации и возможности демпфирования тенсегрити конструкций [6]. Кинетическое трение (трение скольжения) в шарнирных соединениях является важным фактором в ликвидации вибраций. Кроме того, оно было признано более эффективным по сравнению с демпфированием отдельных элементов или активным контролем натяжения. Динамические исследования других конфигураций тенсегрити показали, что вибрации можно регулировать через активное управление самонапряженным состоянием. Дальнейшие исследования динамического поведения тенсегрити системы показали [6], что наложение некоторых собственных частот увеличивает риск возникновения опасных резонансных явлений. Тем не менее, данное опасение может быть устранено путем рационального подбора и обеспечения упругих и инерционных свойств системы. В линеаризованной форме уравнения равновесия системы тенсегрити можно записать в виде [6]:

$$[KT]\{U\} = \{F\}, \quad (7)$$

где: $\{U\}$ – вектор перемещений, $\{F\}$ – вектор внешних сил, $[KT]$ – касательная матрица жесткости, которая может быть записана так:

$$[K_T] = [K_E] + [K_G]. \quad (8)$$

То есть, касательная матрица жесткости $[KT]$ представляет собой сумму линейной матрицы жесткости $[K_E]$ (которая обычно используется для анализа малых деформаций

ферменных конструкций) и геометрической матрицы жесткости $[K_G]$, выведенной по внутренним напряжениям. Следовательно, при исследовании конечно-элементной модели структур тенсегрити, каждый элемент структуры характеризуется следующими матрицами жесткости:

$$[K_E] = \left(\frac{EA}{L}\right) \begin{bmatrix} I_0 & -I_0 \\ -I_0 & I_0 \end{bmatrix}; I_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$[K_G] = \left(\frac{EA}{L}\right) \begin{bmatrix} I_3 & -I_3 \\ -I_3 & I_3 \end{bmatrix}; I_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где: E – модуль упругости, A – площадь элемента, L – длина элемента и T – внутреннее усилие. Матрица жесткости сформирована в локальной системе координат $\{XYZ\}$, где ось X – ось элемента. Глобальная матрица жесткости $[K_T]$ формируется из совокупности характеристик отдельных элементов, выраженных в глобальной системе координат. Таким образом, математическими методами можно не только описать состояние равновесия элементов системы, но и минимизировать воздействие колебаний.

Системы тенсегрити в мостостроении

Впервые предположения о возможности использования идеи «тенсегрити» при проектировании мостов были выдвинуты в 1996 году. 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 [8]. Однако в итоге Миллениум был построен по другому проекту.

Существующие мостовые сооружения по типу тенсегрити

Система тенсегрити в различной степени находит свое применение в мостовых конструкциях, но при этом более интенсивному внедрению идеи самонапряженных элементов препятствует ряд факторов:

- сложность проектирования и адаптации к внешним факторам;
- ограниченный вид создаваемых сооружений;
- недостаточность методологической базы по исследованиям данного метода проектирования конструкций.

В качестве анализа структурных составляющих систем-тенсегрити рассмотрим некоторые мостовые сооружения, в конструкции которых так или иначе задействована система тенсегрити. Исследовав потенциальные сооружения на основе применения принципа тенсегрити, необходимо оценить параметры составных частей конструкций и их эффективность в работе конструкции. На сегодняшний день в мире есть несколько пешеходных мостовых сооружений, в конструкции которых несущие или поддерживающие функции выполняют самонапряженные элементы: в основном элементы-тенсегрити выполняют второстепенную функцию по поддержанию пешеходной части. Исследование некоторых мостов как практических примеров самонапряженных конструкций позволит оценить возможности дальнейшего распространения данного перспективного метода при проектировании новых мостовых сооружений.

Мост Курилпа в Брисбене, Австралия [5]

Крупнейшим мостом, построенным с использованием идеи тенсегрити, является мост Курилпа в Австралийском городе Брисбен. Данный мост как нельзя лучше вписывается под определение тенсегрити ввиду того, что самонапряженная система является основным несущим элементом пролетного строения моста (рис. 2).

Рисунок 2. Мост Курилпа, выполненный по типу тенсегрити [5]

Figure 2. The Kurilpa bridge, made by type of tensegrity [5]

Мост Курилпа Бридж является крупнейшим гибридным мостом – «тенсегрити» в мире и одним из крупнейших пешеходных. Общая длина моста составляет 470 м, основной пролет – 120 м, ширина пролетного строения – 6,5 м, подмостовой габарит – 11 м. Мост рассчитан на пешеходное и велосипедное движение, снабжен двумя площадками для отдыха и навесом от солнца по всей длине моста. Общая стоимость строительства – \$63 млн. Мост состоит из 18 основных стальных конструкций, 20 стальных мачт и 16 горизонтальных распорок. Пролетное строение состоит из 72 сборных железобетонных плит, закрепленных на общей стальной конструкции. Сложная система кабелей и вант состоит из 80 основных оцинкованных вант и 252 кабелей – «тенсегрити» из нержавеющей стали. Всего при строительстве было использовано 550 т стальных металлоконструкций, в том числе 6,8 км прочной стальной спиральной проволоки. Данный мост можно считать эталонным примером тенсегрити систем, ввиду достаточной независимости его основных несущих элементов пролетного строения от опор сооружения.

Мачтовый мост в Пюмеренде (Нидерланды) [8]

Мачтовый мост в Голландии представляет собой пешеходный и велосипедный мост соединяющий город Пюмеренд с ближайшим польдером (рис. 2). основополагающим требованием при возведении этого моста было гармоничное сочетание сооружения с окружающим ландшафтом. По замыслу разработчиков мост должен «парить» над окружающей природой и выполнять роль естественного соединения города с прилегающим торфяным участком. Также в числе основных требований было использование в качестве конструкционного материала алюминия, как наименее подверженного коррозии материала и оказывающего минимальное воздействие на окружающую среду.

Рисунок 2. Мачтовый мост в Пюрмеренде

Figure 2. The mast bridge in Purmerend

<http://www.octatube.nl/en/projects/59/pylonsbridge>

Воплотить проект в жизнь решили, применив принцип тенсегрити, основанный на использовании растяжения и сжатия элементов. При этом сжатые элементы несущей конструкции моста не должны касаться друг друга, соединяясь предварительно натянутыми тросами.

Отличительной особенностью данного сооружения является использование бетонных промежуточных опор в качестве основания для установки мачт и закрепления тросов, рис. 3.

Данные опоры, исходя из особенностей моста и отсутствия судоходства по каналу, сделали в виде продолговатой формы, внешне напоминающими каноэ.

Проходящая часть моста представляет собой длинную пластину, подкрепленную продольными и поперечными алюминиевыми балками и зафиксированную между 36-ю парами стальных мачт трубчатого типа. Для придания необходимой жесткости конструкции и сведения к минимуму необходимости предварительного натяжения модулей, создатели использовали оцинкованную сталь в качестве основного материала для тросов и мачт.

Рисунок 3. Конструкция мачтового моста

Figure 3. The Mast bridge construction

<http://www.octatube.nl/en/projects/59/pylonsbridge>

Характеристики моста:

Длина – 130 м, ширина – 3,5 м.

Материал: сталь, алюминий, бетон.

Место: Пюрмеренд, Нидерланды.

Архитектор: Йорд ден Холландер

Стоимость: 700000 евро.

Год: 2001.

Все пилоны моста по решению проектировщиков были выровнены по одному уровню, что на 6 метров превышало запланированные размеры. Сложности проекту добавило расположение оснований пилонов на различных глубинах. При этом итоговый вид мачт представлял собой симметричный модуль V – образного типа, что весьма неплохо удовлетворяло эстетическим требованиям к сооружению. Также взаимное натяжение с обеих сторон позволило создать некую выпуклость пешеходной части (рис. 4), что в свою очередь положительно скажется на учете влияния погодных условий.

Ввиду достаточной жесткости конструкции и применении алюминия, разработчики особое внимание уделили учету возможного теплового расширения алюминиевых модулей. Через каждые 16 м данные модули соединялись по типу шипа с загнутыми краями, что позволило зафиксировать каждый модуль обособленно.

Рисунок 4. Пешеходный настил моста

Figure 4. Pedestrian floor of bridge

<http://www.octatube.nl/en/projects/59/pylonsbridge>

С учетом характерных особенностей проектирования мостов в Нидерландах, где особую роль отдают архитектурным соображениям и учету особенностей окружающей среды, данный мост представляет собой довольно надежное сооружение, умело сочетающее в себе основную функцию по пропуску пешеходов и велосипедистов с эстетической привлекательностью и сочетаемостью с местной природой. Существенную роль при конструировании сооружения сыграло удачное внедрение принципа тенсегрити, позволившее создать надежную конструкцию с эффективным использованием всех конструкционных материалов.

Велосипедно-пешеходный мост в Алмере, Нидерланды

Несущая способность этого моста обеспечивается взаимным натяжением вант между 11-метровыми пилонами и горизонтальными поперечными балками, поддерживающими пролетное строение (рис. 5). От обычного вантового моста данный мост отличается отсутствием промежуточных опор для пилонов.

Рисунок 5. Мост в Алмере, Голландия

Figure 5. Bridge in Almere, Holland

<http://www.arcspace.com/features/rene-van-zuuk-architekten/almere-bicycle--pedestrian-bridge/>

Характеристики моста: длина 44 м, ширина 6 м; материал: металл; год постройки – 2004.

Пешеходная часть моста выполнена из рифленого алюминиевого настила, огражденного стальными тросами, пилоны оборудованы светильниками, обеспечивающими освещение прохожей части.

Мост Королевы Виктории в доках Лондона

Идея тенсегрити в этом сооружении реализована следующим образом: пилоны у берегов опираются на дно реки, а внутренние пилоны – на пролетное строение (рис. 6). Горизонтальная устойчивость обеспечивается натяжением вант на поперечные балки. Пролетное строение моста представляет собой металлическую балку коробчатого типа, прохожая часть – деревянная.

Рисунок 6. Мост королевы Виктории

Figure 6. Queen Victoria Bridge

<http://happyontist.blogspot.ru/2011/09/london-bridges-16-royal-victoria-dock.html>

Характеристики моста: длина главного пролета 127,5 м; материал: сталь, древесина; постройки – 1998.

Пешеходный мост в Стерлинге, Шотландия [9]

Этот мост обеспечивает движение пешеходов через железную дорогу. Несущая конструкция моста представляет собой как бы набор ферм, образованных из стальных мачт, соединенных тросами (рис. 7). Для обеспечения устойчивости сооружения пилоны имеют разные углы наклона.

Рисунок 7. Пешеходный мост в Стерлинге

Figure 7. The pedestrian bridge in Sterling

<http://happyontist.blogspot.ru/2010/05/scottish-bridges-6-forthside-footbridge>

Характеристики моста: полная длина 114 м, главный пролет 88,2 м; материал: сталь, стекло; год постройки – 2009.

Проекты мостов-тенсегрити

Проект моста в Риме (Италия) [10]

Проект мостового сооружения по типу тенсегрити был разработан научно-исследовательской группой Римского университета Тор Вергата. Перед исследователями стоял весьма сложный вопрос реализации полноценной системы тенсегрити как основной несущей конструкции пешеходного моста, обеспечив при этом достаточную жесткость конструкции. Конструкция подразумевала использование нескольких идентичных модулей (элементов) по типу расширенного октаэдра, который состоит из 8 стержней (распорок) и 24-х тросов. При столь сложной на вид конструкции проектировщики позаботились о наличии достаточного пространства (3 м в ширину, 2,6 м в высоту) для размещения пешеходной части и просторного прохода по мосту.

Конструкция нацелена на максимальное увеличение общей жесткости сооружения. Все статические расчеты осуществлялись с учетом геометрической жесткости из-за сил предварительного напряжения. В целом структура пятую модулями перекрывает расстояние 32 метра. Это количество модулей являлось компромиссным решением ввиду большей жесткости системы с меньшим количеством элементов и большими затратами, связанными с увеличением модулей. В окончательном виде конструкция имеет уклон в 5% от концов к середине (рис. 8, 9).

Рисунок 8. Вид пролетного строения сбоку [11]

Figure 8. Side view of decking [11]

Пешеходная часть сооружения поддерживается 4-мя вертикальными стойками для минимизации крутящих моментов. Продольный размер модуля $L = 7,1$ м.

Рисунок 9. Готовая конструкция [11]

Figure 9. Completed structure [11]

Процесс монтажа сооружения состоит из 3-х этапов:

1. Каждый модуль собирается на заводе. Для удобства транспортировки некоторые элементы отсоединяются от модуля, что позволяет складывать их в компактную систему. Эти элементы оснащены системой регулировки длины, чтобы реализовать желаемую форму и при необходимости осуществить корректировку предварительного модуля.
2. Сборка цельной конструкции осуществляется прямо на месте объекта.
3. Конструкция формируется с помощью предварительного напряжения, что позволяет в свою очередь регулировать элементы системы перед окончательной фиксацией на опорах.

Проект моста в Лозанне (Швейцария) [13]

Научно-исследовательская группа Федерального технического института в Лозанне (Швейцария) спроектировала мостовое сооружение на основе системы тенсегрити. Прохожая часть моста поддерживается 4-мя модулями, состоящими из 4-х, 5-ти и 6-ти угольных элементов (рис. 10), целостность которых поддерживается натянутыми тросами (рис. 11). Общая длина конструкции, служащей переходом через реку, составляет 20 м. Конструкция состоит из 4-х модулей длиной 5 м (рис. 11). Центральные распорки одного элемента соединены с элементами другого для создания единого модуля в виде призмы, т. е. используется универсальный метод конструирования модулей, основанный на геометрии прямой призмы.

Рисунок 10. Модули конструкции [13]
Figure 10. Modules of construction [13]

Рисунок 11. Схема сооружения [13]
Figure 11. Construction scheme [13]

Симметрия конструкции обеспечивается путем зеркального отображения двух модулей. Габарит прохожей части – 2,5 м, ширина – 1,3 м. Этих размеров достаточно для прохода двух человек, одновременно пересекающих мост.

Отличительной чертой данной конструкции является возможность уникальной сборки готового сооружения путем разворачивания (рис. 12). Этот способ заключается в преобразовании модулей системы тенсегрити из компактной конфигурации в расширенную. Данный способ конструирования самонапряженных систем зарекомендовал себя также космической инженерии, а именно в конструировании космических мачт и антенн, транспортировка и раскладка которых происходит в ограниченном пространстве.

Рисунок 12. Разворачивание модулей сооружения [13]
Figure 12. Deployment of construction modules [13]

Раскладка модулей происходит вдоль продольной оси, каждый модуль в процессе увеличивает свою длину (рис. 12). Немаловажную роль здесь играет симметричность геометрических элементов. Разворачивание позволяет избежать множества организационных проблем, создав при этом достаточно жесткую и управляемую систему. Особенностью раскладки модулей является возможность добавления деталей и соединительных элементов в зависимости от геометрических параметров сооружения.

Проект моста из симплекс-модулей²

Этот проект задуман как небольшой пешеходный переход – мостик в городской черте, например для соединения двух зданий (рис. 13).

Рисунок 13. Мост на основе симплекс-модулей

Figure 13. Bridge based on simplex-modules

<http://happyontist.blogspot.ru/search?q=tensegrity>

Основная структура пешеходного моста представляет собой совокупность нескольких симплекс – модулей, при этом соблюдается достаточная жесткость и прочность конструкции при наличии свободного пространства.

Бамбуковый мост по типу тенсегрити³

На рис. 14 изображен проект мостового сооружения, разработанный американским архитектором Майкл Макдоноу.

Рисунок 14. Бамбуковый мост по типу тенсегрити

Figure 14. Bamboo bridge by type of tensegrity

<http://www.michaelmcdonough.com/projects/spec/bambridge.php4>

² Мост (симплекс_метод) Электронный ресурс: <http://happyontist.blogspot.ru/search?q=tensegrity> Дата обращения: 19.11.16.

³ Motro R. Tensegrity: structural systems for the future // Kogan Page Science, U.K., 2003. – 19 p.

Предполагаемое сооружение, способное выдерживать вес, больший собственного в 60 раз, изготавливается из уникального высокопрочного азиатского бамбука и стали. Как видно из рис. 15, система тенсегрити данного моста напоминает подвесную и вантовую конструкцию, но за счет отсутствия промежуточных опор и наличия самонапряженных поддерживающих элементов на пролетном строении, подобный мост можно считать подходящим примером тенсегрити конструкции.

Рисунок 15. Элементы тенсегрити в качестве несущей конструкции моста

Figure 15. Tensegrity elements as the load-bearing structure of bridge

<http://www.michaelmcdonough.com/projects/spec/bambridge.php4>

Проект «Подвесного моста – тенсегрити» в Италии³

Проект пешеходного «подвесного моста – тенсегрити» через реку Сезия, Италия (рис. 16), был разработан Стефано Парадисо и Марко Муседолой.

Рисунок 16. Проект «Подвесного моста – тенсегрити» в Италии

Figure 16. The project of "Suspension bridge – tensegrity" in Italy

<http://tensegritywiki.com/Suspended+Bridge+by+Paradiso>

Сооружение будет располагаться между железнодорожным мостом для высокоскоростного движения и автомагистралью, 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. Особенностью конструкции моста является уширение пролетного строения между пилонами, опирающимися на грунт. Пролетное строение выполнено в виде балки коробчатого типа, перильные ограждения – стеклянные. Проектировщики сооружения старались обеспечить визуальную надежность сооружения при хорошем эстетическом облике.

Заключение

В работе рассмотрены математические характеристики моделей тенсегрити систем – самонапряженных конструкций, состоящих из элементов, работающих в условиях либо чистого сжатия (распорки), либо чистого растяжения (тросы). Кратко рассмотрены вопросы определения подходящей геометрической конфигурации тенсегрити – структур, обеспечивающей наименьшие усилия в элементах, а также вопросы динамического поведения тенсегрити – систем. Далее в работе рассмотрены примеры существующих мостовых сооружений, созданных с использованием тенсегрити – систем. В частности, рассмотрены: мост Курилпа в Брисбене (Австралия), мачтовый мост в Пюрмеренде (Нидерланды), велосипедно – пешеходный мост в Алмере (Нидерланды), мост Королевы Виктории в доках Лондона, пешеходный мост в Стерлинге (Шотландия). В заключительной части работы рассмотрены проекты мостов – тенсегрити: пешеходный мост по типу тенсегрити, разработанный научно-исследовательской группой Римского университета; пешеходный мост из четырех модулей тенсегрити систем, разработанный научно – исследовательской группой Федерального технического института в Лозанне (Швейцария); проект пешеходного перехода между зданиями из симплекс – модулей; проект бамбукового моста по типу тенсегрити, изготавливаемый из бамбука и стали и способный выдерживать нагрузку, превышающую собственный вес в 60 раз; проект пешеходного подвесного моста – тенсегрити через реку Сезия (Италия).

ЛИТЕРАТУРА

1. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Буреев А.К. Применение принципа тенсегрити для создания мостовых конструкций. Часть 1. Общие сведения о системе «тенсегрити» // Транспортные сооружения, Том 4, №2 (2017) <http://t-s.today/PDF/03TS217.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/03TS217.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.

6. Landolf-Giosef-Anastasios Rhode-Barbarigos. An Active Deployable Tensegrity Structure // Thèse no 5457 (2012) École Polytechnique Fédérale De Lausanne Présentée le 17 août 2012 À la faculté de l'environnement naturel, architectural et construit laboratoire d'informatique et de mécanique appliquées à la construction programme doctoral en structures, Suisse 2012.
7. Bel Hadj Ali, N., L. Rhode-Barbarigos, et al. (2011). Analysis of clustered tensegrity structures using a modified dynamic relaxation algorithm // International Journal of Solids and Structures 48(5): 637-647.
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.
9. 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.
10. Micheletti A. Modular tensegrity structures: The TorVergata footbridge II Mechanics, Models and Methods in Civil Engineering, № 61, 2012. – pp. 375-384.
11. A pedestrian walkway tensintegra to the campus of Tor Vergata Andrea Micheletti Department of Engineering / The forum for university work / Rome, Italy, April 1, 2009.
12. Nizar Bel Hadj Ali, René Motro and Ian F.C. Smith. Designing tensegrity modules for pedestrian bridges, Land of Rhode-Barbarigos // Applied Computing and Mechanics Laboratory, Structural Engineering Institute, Station 18, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne CH-1015, Switzerland.
13. 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.

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 2. The "tensegrity" system overview

Abstract. In their paper, the authors consider the mathematical adjectives of the tensegrity system models – self-stressed structures consisting of elements operating under conditions of either pure compression (struts) or pure tension (ropes). The problems of determining the appropriate geometric configuration of tensegrity structures providing the least efforts in elements, as well as questions of the dynamic behavior of tensegrity systems are briefly considered. Further, the work presents examples of the existing bridge structures created using the tensegrity systems. In particular, the following structures are considered: the Kurilp bridge in Brisbane (Australia), the mast bridge in Purmerende (Netherlands), the bicycle – pedestrian bridge in Almere (Netherlands), the Queen Victoria Bridge in London docks and the Sterling pedestrian bridge (Scotland). In the final part of the work, the following tensegrity – bridge projects are considered: the pedestrian bridge of tensegrity type, developed by the research team of the Rome University; the pedestrian bridge consisting of the four modules of tensegrity systems, developed by the research team of the Federal Technical Institute in Lausanne (Switzerland); the project of pedestrian crossing between buildings made from simplex-modules; the project of a bamboo bridge of tensegrity type, made of bamboo and steel and capable of withstanding a load exceeding its own weight by a factor of 60, and the project of a pedestrian suspension bridge of tensegrity type through the river Sesia (Italy).

Keywords: self-stressed systems; tensegrity; compressed-tensioned systems; architecture of tensegrity systems; tensegrity modules; mathematical adjectives of tensegrity modules; pedestrian tensegrity-bridges

REFERENCES

1. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Bureev A.K. (2017). Application of the principle of Tensegrity for the creation of bridge structures. Part 1. General information about the system "Tensegrity". *Russian journal of transport engineering*, [online] 2(4). Available at: <http://t-s.today/PDF/03TS217.pdf> (in Russian). DOI 10.15862/03TS217.
2. 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.

3. 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).
4. 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).
5. 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.
6. Landolf-Giosef-Anastasios Rhode-Barbarigos. (2012). An Active Deployable Tensegrity Structure. *Thèse no 5457 (2012) École Polytechnique Fédérale De Lausanne*.
7. Bel Hadj Ali, N., L. Rhode-Barbarigos and etc. (2011). Analysis of clustered tensegrity structures using a modified dynamic relaxation algorithm. *International Journal of Solids and Structures*, 48(5), pp. 637-647.
8. Ovchinnikov I.G., Kokodeev A.V. (2015). Self-stressed constructions of "Tensegrity". *Proceedings of the 15th International Scientific and Technical Conference*, pp. 80-81. (in Russian).
9. Motro R., Maurin B., Silvestri C. (2006). Tensegrity Rings and the Hollow Rope. *In Proceedings of the IASS Symposium 2006, New Olympics, New Shells and Spatial Structures*, pp. 470-475.
10. Micheletti A. (2012). Modular tensegrity structures. *The TorVergata footbridge II Mechanics, Models and Methods in Civil Engineering*, 61, pp. 375-384.
11. (2009). A pedestrian walkway tensintegra to the campus of Tor Vergata Andrea Micheletti Department of Engineering. *The forum for university work*.
12. Nizar Bel Hadj Ali, René Motro, Ian F.C. Smith (n.d.). Designing tensegrity modules for pedestrian bridges, Land of Rhode-Barbarigos. *Applied Computing and Mechanics Laboratory, Structural Engineering Institute*.
13. Boeck J.D. (2013). Tensegrity bridges, Concept design of pedestrian bridges using tensegrity as load carrying system. *Delft University of Technology*, p. 265.