

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2023, Том 15, № 2 / 2023, Vol. 15, Iss. 2 <https://esj.today/issue-2-2023.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/06SAVN223.pdf>

Ссылка для цитирования этой статьи:

Арутюнян, Л. А. Область применения потенциально реализуемых пространственных систем «Тенсегрити» в строительной индустрии. Часть 2. Рассмотрение возведения конструкций «Тенсегрити» через «призму рациональности» / Л. А. Арутюнян, И. Г. Овчинников, И. А. Севрунов // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15. — № 2. — URL: <https://esj.today/PDF/06SAVN223.pdf>

For citation:

Arutiunian L.A., Ovchinnikov I.G., Sevrnov I.A. Scope of potentially implementable spatial Tensegrity systems in the construction industry. Part 2. Consideration of the construction of Tensegrity structures through the "prism of rationality". *The Eurasian Scientific Journal*. 2023; 15(2): 06SAVN223. Available at: <https://esj.today/PDF/06SAVN223.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.)

Арутюнян Левон Анушаванович

ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия
E-mail: arutiunian.lan@students.dvfu.ru

Овчинников Игорь Георгиевич

ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия
Профессор кафедры «Автомобильные дороги и мосты»
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия
Профессор кафедры «Транспортное строительство»
Доктор технических наук
E-mail: bridgesar@mail.ru

Севрунов Иван Алексеевич

ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия
E-mail: sevrnov.ial@students.dvfu.ru

Область применения потенциально реализуемых пространственных систем «Тенсегрити» в строительной индустрии. Часть 2. Рассмотрение возведения конструкций «Тенсегрити» через «призму рациональности»

Аннотация. В рамках настоящей статьи изучена область применения самонапряженных конструкций «Тенсегрити» в строительной индустрии. В первой части [1] на основании изложенных преимуществ и недостатков были выявлены более перспективные направления для реализации, а также выделены основные «признаки», по которым можно интерпретировать конструкцию как «Тенсегрити». В настоящей статье были выявлены наиболее реализуемые конструкции «Тенсегрити», возведение которых обосновано с точки зрения целесообразности. В ходе исследования были изучены башенные, арочные, активные, трансформирующиеся, мостовые и мембранные сооружения. Далее данные конструкции были проанализированы через призму критериев «Относительная простота технологии возведения»; «Целесообразность»; «Возводимое сооружение является ценным с точки зрения архитектуры (визуальной привлекательности)»; «Отсутствие перерасхода материала по отношению к классическому исполнению подобных конструкций»; «Возводимое сооружение содержит конструктивное обоснование». После чего было выявлено несколько наиболее перспективных вариантов, которые при должном, углубленном исследовании могут обрести широкое

распространение в гражданском строительстве. Одним из основных фактов, обосновывающих изучение мембранных «Тенсегрити», является легкость конструкции и обеспечение большого пространства без поддерживающих опор. Также данный тип конструкций имеет разработанную технологию возведения, согласно ей сооружение возможно сконструировать без применения специального оборудования. Однако мембранные «Тенсегрити» нуждаются в доработке, так как не обеспечивают достаточную несущую способность для полноценной эксплуатации (в не лабораторных условиях). Основным преимуществом пешеходных мостов из «Тенсегрити» является «непередаваемое» ощущение «левитации» при ходьбе, также подобные пешеходные мосты представляют особую архитектурную ценность и позволяют более лаконично вписать столь тривиальную конструкцию как переход в естественные условия (парки, заповедники и т. д.). Однако возведение таких сооружений усложнено отсутствием алгоритма для расчета пешеходных мостов «Тенсегрити», данная тема остаётся актуальной для последующего изучения.

Ключевые слова: «Тенсегрити»; архитектура; строительство; проектирование; конструкции; самонапряженные системы; сжато-растянутые системы; модули «Тенсегрити»

Введение

В первой части были рассмотрены преимущества и недостатки самонапряженных конструкций «Тенсегрити» с перспективой дальнейшей их реализации в строительной индустрии [1], также были обозначены рациональные векторы для детального изучения уже во второй (настоящей) части научно-исследовательской статьи.

Преимущества и недостатки были выявлены, основываясь на особенности распределения нагрузок (элементы испытывают либо чистое сжатие, либо чистое растяжение). В процессе изучения различных типов вантовых конструкций были выявлены признаки, по которым можно отнести ту или иную конструкцию к «Тенсегрити» с последующей целью выявления более перспективных и целесообразных к возведению типов конструкций.

Для реализации какой-либо конструкции необходимо изучить конструктивные и технологические составляющие строительно-монтажных работ. Основная проблема в изучении систем «Тенсегрити» — дефицит конструктивной информации о практике возведения подобных конструкций.

Существует большое количество литературы о геометрии, художественной форме и архитектурной привлекательности «Тенсегрити» структур, но мало о динамике и механике этих структур.

Так как в настоящей статье рассматриваются системы с дальнейшей перспективой их реализации, то более рациональным является подход усиления сильных сторон конструкции, которые позволят «обойти» трудно решаемые задачи в технологии возведения и/или иных прикладных задач, препятствующих полноценной реализации систем «Тенсегрити», как полноценных конструкций.

Ввиду достаточно обширной области применения данных конструкций, которая была подробно описана в первой части настоящего научного исследования [1], образуется достаточно широкий спектр конструкций, после тщательного анализа можно обнаружить конструкции, которые в зависимости от поставленных задач, могут полностью нивелировать недостатки и тем самым исключить необоснованные затраты и риски. Проведем частный анализ каждой конструкции на предмет целесообразности ее возведения.

1. Область применения систем «Тенсегрити»

1.1 Применение башенных систем «Тенсегрити» в гражданском строительстве

Башенные конструкции, изображенные на рисунке 1, благодаря своему футуристическому и нетривиальному внешнему виду, привлекают особое внимание, однако по следующим причинам (из [1]):

- низкая внутренняя жесткость при более целесообразном подходе к проектированию тенсегрити-системо-подобных структур;
- вероятность не достичь проектных показателей несущей способности при возведении крупных конструкций.

Возведение подобных башен в больших масштабах не является целесообразным. Так как жесткость таких конструкций обеспечивается только тросами (стержни не имеют непосредственного контакта между собой), а горизонтальная нагрузка (представленная в первую очередь ветром) согласно СП «Нагрузки и воздействия» повышается по мере увеличения высоты сооружения, это приводит к повышенной податливости сооружения. Если исключить необходимость нахождения элементов в полностью статичном положении, то есть допустить определенные колебания конструкции, они могут подойти для башен теле-коммуникационных сетей.



Рисунок 1. Успешно реализованные башни «Тенсегрити» [2]

Башни для обеспечения сети и связи: при условии допустимости относительно небольших перемещений в конструкции, тенсегрити-башни могут успешно использоваться в качестве опорных конструкций для размещения антенн, приемников, радиопередатчиков, передатчиков мобильных телефонов [3]. Однако данное применение остается обоснованным лишь с точки зрения архитектурной привлекательности, так как ввиду множества проблем при возведении, классическое исполнение телебашен является более целесообразным с точки зрения стоимости.

1.2 Применение арочных систем «Тенсегрити» в строительстве

Наряду с башнями особое внимание привлекают и арки «Тенсегрити» (рис. 2). Данный факт весьма оправдан, так как арки образованы путем искривления вертикальной оси башенного «Тенсегрити» и лишен эксплуатационного недостатка: возрастающей нагрузки по мере увеличения высоты.

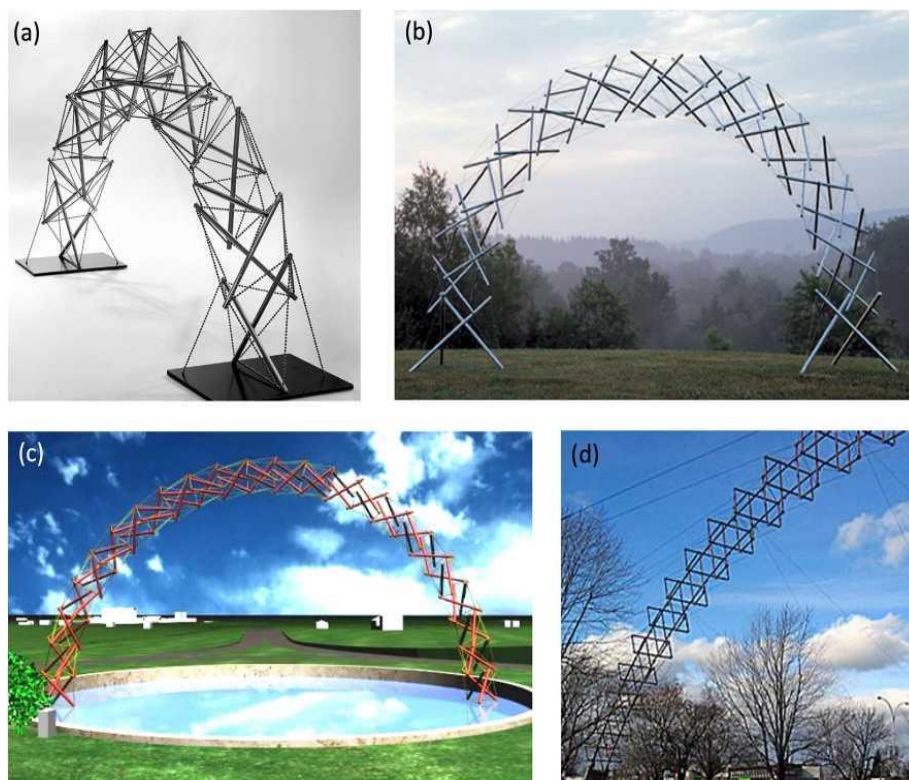


Рисунок 2. Иллюстрация «Тенсегрити» систем арочного типа [2]

Данный тип конструкций так же не снискал популярности в строительной индустрии, так как оказался неконкурентоспособным (аналогичные конструкции из ферм, выполненные на основании типовых решений, наработанных годами, оказались более доступными), а усложнение расчетов из-за нелинейной работы вантовых элементов привело к нецелесообразности возведения подобных конструкций. Вследствие чего данные конструкции были причислены к декоративным и не получили широкого распространения.

1.3 Применение стержневых систем «Тенсегрити» при возведении мостовых конструкций

Современные тенденции возведения пешеходных мостов включают себя множество нетривиальных решений [4]; однако отдельного упоминания стоят «Тенсегрити» мосты, в которых системы действительно оправдали свое применение. В качестве примера может служить пешеходный мост «Тор Вергатамы» разработанный в 2003 году в сотрудничестве с Сильвано Стукки, изображенный на рисунке 3.



Рисунок 3. Иллюстрация тенсегрити моста [2]

Согласно задумке, мост должен был выполнять функцию переправы к территории Инженерной школы «Тор Вергат» и создавать особое ощущение в процессе прохождения по нему, так как в процессе конструирования соблюдались все принципы Снелсона, которые были изложены в первой части статьи [1]. Однако это привело к определённым издержкам, которые были разрешены путем внедрения взаимосвязанных модулей «Тенсегрити», тем самым обеспечив необходимую общую жесткость с помощью предварительно напряженных тросов в составных частях конструкции.

В рамках проектирования пешеходного моста в Калифорнийском университете в Луване было предложено весьма нетривиальное решение и реализована самонапряженная конструкция «Тенсегрити» (рис. 4) [5].

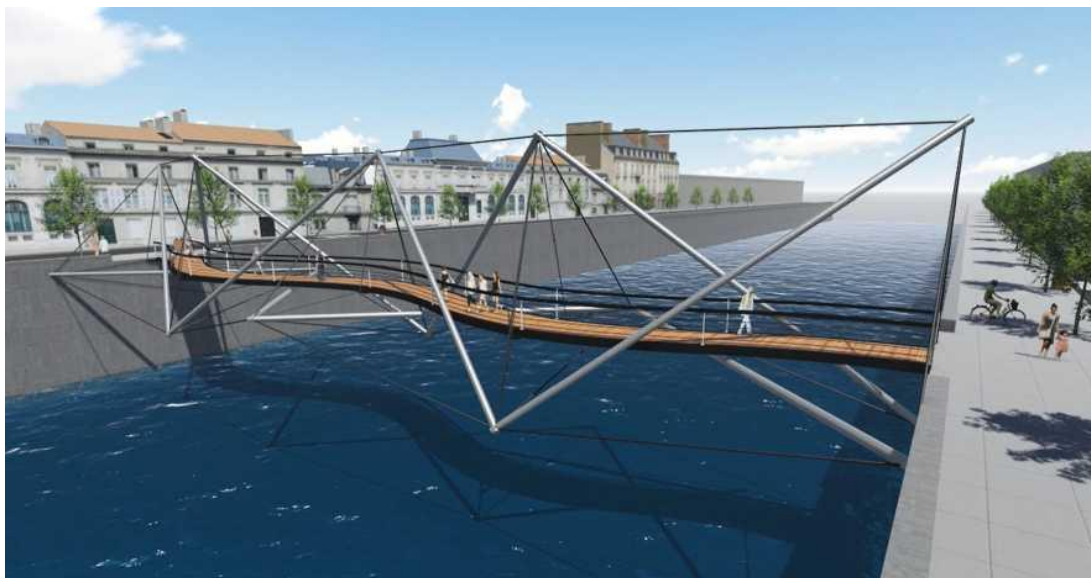


Рисунок 4. Сооружение, представленное Джоном Фероном и Пьером Латтером, Калифорнийский университет в Лувене [5]

Несмотря на «невзрачность» архитектурной составляющей — конструктивная, несомненно, является уникальной в своем роде, мост буквально описывается двумя взаимно ассиметричными ломаными поясами, которые в местах излома связываются между собой тросами. Данный концепт представляет наглядную демонстрацию того, что системы «Тенсегрити» позволяют архитекторам обрести огромный простор для реализации самых смелых решений, однако задают особые требования для просчета формообразования и создают необходимость в проявлении особых инструментов моделирования, позволяющих провести формообразование с последующим расчетом.

На основании анализа двух мостовых сооружений «Тенсегрити» можно констатировать, что возведение данного типа конструкций включает не только архитектурное обоснование, но также позволяет испытать особое чувство «левитации» в процессе эксплуатации. Основными препятствиями в возведении являются отсутствие алгоритмов для расчета и формообразования в рамках проектирования и отсутствие разработанной технологии возведения подобных конструкций.

1.4 Применение пространственных систем «Тенсегрити» с мембранной основой

В целом направление по изучению структурных мембран можно считать эффективным, так как мембраны обладают неоспоримыми преимуществами перед плитными и рамными конструкциями. Например, компенсируют деформации конструкции, но при этом элегантно

сочетают в своей функции пространственное ограждение со свойствами материалов. К одним из наиболее перспективных типов мембранных структур являются мембранные тенсегрити-структуры, которые состоят из прерывистых распорок, встроенных в натянутую мембрану [6]. На сегодняшний день мембранные тенсегрити-структуры ограничены полностью закрытыми образованиями и/или требуют обширной привязки, что затрудняет их применимость в различных архитектурных концептах. Мембранные «Тенсегрити» ввиду относительной простоты монтажа и реализации можно отнести к потенциально реализуемым сооружениям, проведем более подробный анализ данной конструктивной схемы.

1.5 Дизайн и моделирование мембранного «Тенсегрити»

Согласно [6] мембранные тенсегрити-структуры моделировались с использованием нелинейного метода конечных элементов (МКЭ) в контексте вычислительной механики в течение нескольких лет (Хуан и Миратс Тур, 2008; Шигемацу и др., 2008; Ян и Султан, 2016).

Однако реализованные архитектурные концепты структурных систем мембранного «Тенсегрити» редки из-за недостаточной осведомленности в структурной типологии, учитывая, что современные текстильные конструкции не получили распространения до 1950-х годов. Несмотря на то, что в последнее десятилетие проводились активные исследования по созданию текстильных гибридных структур, активных на изгиб (Slabbinck et al. 2017), они отличаются от мембранных структур «Тенсегрити», в которых существует только чистое растяжение и сжатие. Примером может служить мембранный тенсегрити-павильон MOOM, построенный «C+A Coelacanth and Associates» и спроектированный студентами Токийского научного университета в 2011 году, который является единственной на сегодняшний день полномасштабной мембранной тенсегрити-структурой, представляющей из себя 26-метровую конструкцию, состоящую из полиэфирной мембраны со вставленными алюминиевыми трубчатыми распорками (рис. 5).¹



Рисунок 5. Павильон «Kazuhiro Kojima», лаборатория «Kazuhiro Kojima», Токийский университет науки, инженеры-конструкторы «JUN SATO» и «TAIYO KOGYO»¹

¹ C+A — Coelacanth and Associates | MOOM [Электронный ресурс]. URL: <https://c-and-a.co.jp/en/projects/moom/> (дата обращения: 13.10.2022).

В павильоне MOOM выявлены следующие недостатки: в конструкции используются внешние тросы для обеспечения геометрической неизменяемости системы, что говорит о том, что ступенчатый рисунок, в котором распорки распределены в мембране, не обеспечивает необходимого для ее автономности внутреннего предварительного натяжения, форма павильона представляет собой закрытую воронку с импровизированным входом (отверстием, прорезанным в ткани), данный факт свидетельствует о наличии ограничений, которые препятствуют эксплуатации. Однако группе исследователей из Сингапурского университета технологий и дизайна (SUTD) [6] удалось разработать автономную «Тенсегрити» оболочку с предусмотренными входными проемами (рис. 6), в том числе благодаря использованию визуального программирования в качестве «инструмента» для определения проектного положения составных элементов.

В результате исследования был построен крупномасштабный демонстрационный образец, павильон площадью 10 м^2 (рис. 6) на основе мембранной тенсегрити-оболочки.



*Рисунок 6. Павильон-студия созданный,
Сингапурский университет технологий и дизайна (SUTD) [6]*

Затем благодаря анализу образца были разработаны инструменты вычислительной тесселяции распорок, которые позволяют вычислять ориентирование и рациональность пространства для дальнейшего детального проектирования.

Благодаря вышеизложенным исследованиям можно сделать вывод о потенциальной реализуемости возведения пространственных конструкций «Тенсегрити» мембранного типа, которые имеют широкую область применения, от временных сооружений для укрытия от солнечных лучей, до создания крытых площадок для проведения публичных мероприятий, предусматривающих скопление большого количества людей. Основной проблемой в возведении является подбор соответствующего материала для мембраны, который может выдержать распор от стержней, и может обеспечить достаточную жесткость для конструкции, способную выдержать эксплуатационные нагрузки.

1.6 Применение активных систем «Тенсегрити»

Активные «Тенсегрити» — это те структуры, которые могут контролировать свою форму и адаптироваться к поставленным задачам и окружающей среде, изменяя свою внутреннюю нагрузку (рис. 7). Ввиду перспективности и универсальности данного применения «Тенсегрити» проведем комплексный анализ исследований, а затем спроецируем на тезисы,

преследуемые настоящей статьей, а именно область применения и реализуемость подобных конструкций. Согласно обширным исследовательским работам по изучению теоретических аспектов управления тенсегрити-структурами (геометрическое поведение которых является нелинейным и связанным) существуют три задачи, которые могут быть решены управлением структурами «Тенсегрити», а именно поддержание формы, минимизация прогибов и структурная оптимизация. Например: управляя длиной распорок, Джуади (1998) контролировал вибрации четырех модулей «Тенсегрити», образующих консольную балку. Султан (2009 г.), изменением длины кабеля, контролировали форму одномодульной конструкции, а за счет симметричного движения, основанного на Лагранжевой динамике, контролировал высоту верхнего уровня под нагрузкой.



Рисунок 7. Развертываемая сетка, предложенная Gomez-Jauregui et al. и его базовый модуль (фото любезно предоставлено Валентином Гомес- Хауреги, Университет Кантабрии) [6; 11]

Fest (2003) экспериментировал с трехмодульной регулируемой (вручную) конструкцией и выявил, что нелинейное геометрическое поведение возникает в случаях:

1. Небольших прогибов.
2. Нагрузок, приложенных к нескольким соединениям.
3. Комбинаций регулируемых телескопических стоек.

В 2004 году Фестин разработал полностью активную асимметричную тенсегрити-структуру с пятью модулями, внедрив систему управления, основанную на стохастическом поиске. Фест (2003), а затем Адам (2008) продемонстрировали возможность использования контроля для поддержания заданного отношения между узловыми точками (работа Адама включала выбор нескольких целей, таких как наклон, напряжение, ход и жесткость). Вторая цель минимизации отклонений также изучалась Джуади (1998), с помощью мгновенного оптимального управления удалось минимизировать отклонения. Затем Адам Раджа (2008) разработал алгоритм, удовлетворяющий множеству целей, а Миленко Масич и Скелтон (2005) разработали путь начального выбора параметров (таких как силы предварительного

напряжения элементов). Все эти работы направлены на создание одновременного контроля и оптимизации структуры «Тенсегрити».

Исследования складных/развертываемых «Тенсегрити» впервые проведенные Фуруа [7] и Ханаор [8] были продолжены Оппенгеймом и Уильямсом [9], Султаном и Скелтоном [10]. Дефоссе [12] описал свойства бистабильности конкретных «Тенсегрити» сооружений. Фест и др. [12] спроектировали и реализовали предварительно напряженную модульную систему, способную реагировать на внешние воздействия; длина телескопических стоек, которая регулируется с помощью алгоритма стохастического поиска. Шенк [13] проанализировал и спроектировал призму «Тенсегрити» с нулевой жесткостью, которая может двигаться по непрерывному пути равновесных симметричных размещений, демонстрируя поведение, подобное механизму. Фратернали исследовали использование геометрически изменяемых конструкций для «кинетических» солнечных фасадов умных зданий. Для получения адаптивных «Тенсегрити» рассматривалась трехступенчатая башня с изменяемой формой и возможностью перестройки частоты, также в [14; 15] дана матричная формулировка для моделирования «Тенсегрити» с антагонистическим срабатыванием.

Основная причина, по которой концепции «Тенсегрити» находят применение в развертываемых структурах и структурах с изменяемой геометрией, заключается в том, что они обладают свойством, именуемым авторами: «FF», то есть с помощью приводных тросов или стержней они могут переходить из одной конфигурации в другую через непрерывный путь равновесных размещений. Более того, благодаря отсутствию шарниров между стержнями механическое поведение (плавающе-компрессионных систем) можно предсказать с большей точностью, в отличие от поведения обычных шарнирных систем.

1.7 Развертываемые системы «Тенсегрити»

Система, которая может существовать в двух или более различных конфигурациях называется развертываемой. Одна из этих конфигураций является рабочей, другая конфигурация является «перераспределенной», которая обычно используется для транспортировки или хранения системы. Примером развертываемого «Тенсегрити» является кольцо (рис. 8), которое было запроектировано с целью применения его в космосе для развертывания сетчатого отражателя. Так как при отправке ключевыми являются характеристики веса и объема транспортируемых конструкций здесь нашли применение конструкции «Тенсегрити» с развертываемой структурой, рассмотрим исследования по применению систем «Тенсегрити» в космосе.

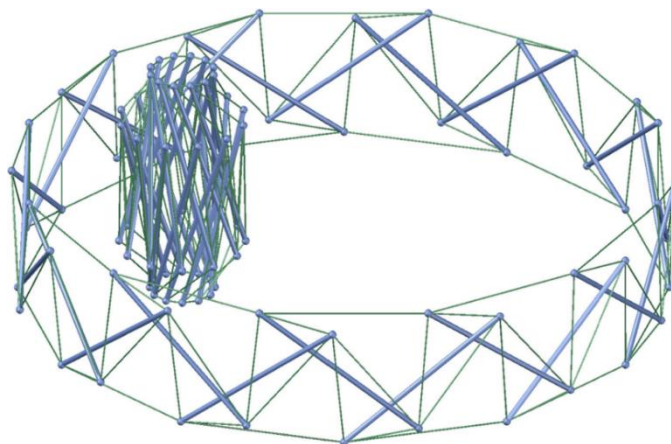


Рисунок 8. Изображение развертываемой конструкции в сложенном и развернутом состоянии [16]

Первые исследования подобных конструкций проводились в Тиберте [17]; развертываемый рефлектор «Тенсегрити» для малых спутников был описан в [18], выдвижная мачта в [19]; различные развертываемые мачты были проанализированы в [20]. Крейн и др. (2000) предложили развертываемую антенну на основе призмы «Тенсегрити» [20], которая вдохновила Стерна на патент [21]. Рассел и Тиберт [16] смоделировали развертывание «Тенсегрити» с надувными натяжными элементами, которые не требуют жесткости.²

Анализ области применения активных систем «Тенсегрити»:

Таким образом, активные системы «Тенсегрити» могут найти применение в ряде конструкций и успешно выполнять свою функцию, однако лишь часть решений с трудом можно назвать рациональными и обоснованными. Например: конструкции фасада из «Тенсегрити» не выдерживают никакой критики в области затрат на организацию и возведение подобной конструкции. Основная проблема применения активных систем «Тенсегрити» в Земных условиях — обеспечение равновесного положения всех составных элементов конструкции в процессе перехода из одного состояния в другое, особенно это сказывается на масштабных объектах. Однако системы «Тенсегрити» можно считать рациональным в космическом пространстве за счет экономии пространства, легковозводимости и оптимальному соотношению массы к размерам конструкции. В целом развертывание любой конструкции полностью зависит от того, как развернуты стойки; скорость развертывания должна легко контролироваться. Найт перечислил четыре возможных решения для развертывания распорок:

1. Шарнирные распорки.
2. Распорки со скользящей муфтой.
3. Телескопические распорки и надувные распорки.

Однако телескопические конструкции не оправдали ожиданий в космических концептах из-за чрезмерного веса и требуемой движущей силы. Также нельзя упускать еще одну из проблем конструкции, которая имеет немаловажное значение для развертываемых конструкций с тросами, а именно предотвращение заедания. Поясним: существует большой риск того, что длинные провисающие кольцевые тросы зацепятся или намотаются на стойку во время развертывания.

2. Методы

Предметом для изучения текущей научной исследовательской работы является изучение области применения пространственных систем «Тенсегрити» в строительной индустрии на основании данных из отечественных, а также зарубежных источников (обозначены в списке литературы). В целях наглядной иллюстрации результатов занесем данные в сводную таблицу 1:

Критерий «Относительная простота технологии возведения» характеризует наличие опыта в возведении подобных конструкций на практике или какой-либо методики, по которой предполагается возведение сооружения.

Критерий «Целесообразность» характеризует обоснованность применения «Тенсегрити» в качестве тех или иных целей. Для примера башенные тип «Тенсегрити» по причине высоких колебаний представляет весьма спорное решение.

² Stern I. United States patent № 6542132 / Stern I. — 2001. — С. 1–8. [Электронный ресурс]. URL: <https://patents.google.com/patent/US6542132>.

Критерий «Возводимая сооружение содержит является ценным с точки зрения архитектуры (визуальной привлекательности)» характеризует визуальную составляющую конструкций, выполняют ли они исключительно заложенную конструктивную, инженерную функцию или так же представляют из себя архитектурную ценность. Например, трансформирующиеся «Тенсегрити» несут малую архитектурную «нагрузку» и создаются для выполнения четко сформулированных задач.

Критерий «Отсутствие перерасхода материала по отношению к классическому исполнению подобных конструкций» характеризует конкурентоспособность конструкций в рамках рыночной стоимости подобных конструкций с альтернативной конструктивной схемой. На фоне остальных «Тенсегрити» выделяется мембранный тип, за счет меньшего собственного веса себестоимость таких конструкций ниже, чем у купольных конструкций классического исполнения.

Критерий «Возводимое сооружение содержит конструктивное обоснование» характеризует наличие причин, по которым конструкция должна быть исполнена именно в вантовом, преднапряженном состоянии.

Таблица 1

**Критерии по анализу рентабельности
возведения «Тенсегрити» в условиях Земной гравитации**

№	Тип сооружения «Тенсегрити»	Относительная простота технологии возведения	Целесообразность	Возводимая сооружение содержит является ценным с точки зрения архитектуры (визуальной привлекательности)	Отсутствие перерасхода материала по отношению к классическому исполнению подобных конструкций	Возводимое сооружение содержит конструктивное обоснование
1	Башенные системы	+	-	+	-	-
2	Арочные системы	-	-	+	-	-
3	Пешеходные мосты	+	+	+	-	+
4	Мембранные	+	+	+	+	+
5	Активные системы	-	-	-	-	+
6	Развертываемые системы	-	-	-	-	+

В рамках исследовательского процесса принимал непосредственное участие Доктор технических наук Овчинников Игорь Георгиевич, представляющий СГТУ «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», ул. Политехническая, 122 к5, 410054 Саратов, Россия, а так же студенты 6 курса Арутюнян Левон Анушаванович, Севрунов Иван Алексеевич, представляющие ДВФУ «Дальневосточный Федеральный университет», п. Аякс, 10, 690922 Владивосток, Россия.

3. Результаты

Таким образом рассмотрение «Тенсегрити» систем, (которые не включают элементы классического каркасного строительства) в качестве строительных конструкций, сталкивает нас с тем, что зачастую они не так эффективны, как привычные гражданскому строительству каркасные конструкции. Снельсону как художнику была безразличная несущая составляющая

систем «Тенсегрити», в большинстве работ при проектировании был учтен лишь собственный вес конструкции. Однако в ходе анализа области применения удалось вывить несколько конструкций, возведение которых обосновано, а в некоторых случаях и рационально:

1. Возведение мембранных «Тенсегрити».
2. Возведение пешеходных мостов с использованием систем «Тенсегрити».

В качестве рационального вектора для изучения можно выделить две особо актуальные темы, направленные на изучение вышеизложенных конструкций: «Применение полимерных материалов в мембранных системах «Тенсегрити», а также «Исследование пространственных систем «Тенсегрити» с использованием визуального программирования».

Обсуждение

Ценность настоящей работы представлена в присущей ей приземленности и в прикладном характере в вопросе реализации систем «Тенсегрити». Приведены основные, потенциально реализуемые сферы для возведения подобных конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арутюнян, Л.А. Область применения потенциально реализуемых пространственных систем «Тенсегрити» в строительной индустрии. Часть 1. Определение конструкций как «Тенсегрити» / Л.А. Арутюнян, И.Г. Овчинников, И.А. Севрунов // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15. — № 1. — URL: <https://esj.today/PDF/41SAVN123.pdf>.
2. Micheletti A., Podio-Guidugli P. Seventy years of tensegrities (and counting) // Archive of Applied Mechanics. — 2022. — Т. 92. — № 9. — P. 2525–2548. URL: <https://link.springer.com/10.1007/s00419-022-02192-4>.
3. Meena T. An insight into research perspectives of Tensegrity Structures / Meena T. // Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences — 2017. — Т. 10 — № 1 — P. 473–482. [Электронный ресурс]. URL: https://jchps.com/issues/Volume10_Issue1/97-0650916.pdf.
4. Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Караханян А.Б. Современные тенденции в проектировании пешеходных мостов // Дороги и мосты. — 2015. — Т. 1. — № 33. — С. 177–194. URL: <http://rosdornii.c11533.shared.hc.ru/files/28-07-2015/14.pdf>.
5. Feron J. et al. Optimization of footbridges composed of prismatic tensegrity modules // Journal of Bridge Engineering. — 2019. — Т. 24. — № 12. — P. 04019112. [Электронный ресурс]. URL: [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001438](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001438).
6. Gupta S.S., Jayashankar D.K., Tracy K.J. Dynamic Space Truss-Textile Membrane Assemblies // Proceedings of IASS Annual Symposia. — International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), 2019. — Т. 2019. — № 14. — P. 1–8. URL: https://www.researchgate.net/publication/341204085_Tensile_Configurations_Exploring_Spatial_Membrane_Tensegrity_Shell_Structures/citations#fullTextFileContent.

7. Furuya H. Concept of Deployable Tensegrity Structures in Space Application / Furuya H. // International Journal of Space Structures — 1992. — Т. 7 — № 2 — P. 143–151. [Электронный ресурс]. URL: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/026635119200700207>.
8. Hanaor A. Double-layer tensegrity grids as deployable structures // International Journal of Space Structures. — 1993. — Т. 8. — № 1-2. — P. 135–143. <https://doi.org/10.1177/0266351193008001-214>.
9. Oppenheim I.J., Williams W.O. Tensegrity prisms as adaptive structures // ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. — American Society of Mechanical Engineers, 1997. — Т. 18220. — P. 113–120. <https://doi.org/10.1115/IMECE1997-0184>.
10. Sultan C., Skelton R.T. Tendon control deployment of tensegrity structures // Smart Structures and Materials 1998: Mathematics and Control in Smart Structures. — SPIE, 1998. — Т. 3323. — P. 455–466. URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/3323/0000/Tendon-control-deployment-of-tensegrity-structures/10.1117/12.316325.short?SSO=1>.
11. Gomez-Jauregui V. Design, Fabrication and Construction of a Deployable Double-Layer Tensegrity Grid / Gomez-Jauregui V., Quilligan M., Manchado C., Otero C. // <https://doi.org/10.1080/10168664.2018.1431379> — 2018. — Т. 28 — № 1 — P. 13–20.
12. Fest E. Active Tensegrity Structure / Fest E., Shea K., Smith I.F.C. // Journal of Structural Engineering — 2004. — Т. 130 — № 10 — P. 1454–1465. [Электронный ресурс]. URL: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9445%282004%29130%3A10%281454%29>.
13. Schenk M. Zero stiffness tensegrity structures / Schenk M., Guest S.D., Herder J.L. // International Journal of Solids and Structures — 2007. — Т. 44 — № 20 — P. 6569–6583. [Электронный ресурс]. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020768307001096>.
14. Micheletti A., dos Santos F.A., Sittner P. Superelastic tensegrities: matrix formulation and antagonistic actuation // Smart Materials and Structures. — 2018. — Т. 27. — № 10. — P. 105028. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-665X/aadaa5/meta>.
15. Aldrich J.B., Skelton R.E., Kreutz-Delgado K. Control synthesis for a class of light and agile robotic tensegrity structures // Proceedings of the 2003 American Control Conference, 2003. — IEEE, 2003. — Т. 6. — P. 5245–5251. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1242560>.
16. Zolesi V.S. et al. On an innovative deployment concept for large space structures // 42nd International Conference on Environmental Systems. — 2012. — P. 3601. URL: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2012-3601>.
17. Tibert A G., Pellegrino S. Deployable tensegrity reflectors for small satellites // Journal of Spacecraft and Rockets. — 2002. — Т. 39. — № 5. — P. 701–709. URL: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/2.3867>.
18. Tibert G., Pellegrino S. Deployable tensegrity masts // 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. — 2003. — P. 1978. URL: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2003-1978>.

19. Zawadzki A., Al Sabouni-Zawadzka A. In search of lightweight deployable tensegrity columns // Applied Sciences. — 2020. — Т. 10. — № 23. — P. 8676. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/23/8676>.
20. Knight B. et al. Innovative deployable antenna developments using tensegrity design // 41st Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit. — 2000. — P. 1481. URL: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2000-1481>.
21. Russell C. Deployment Simulations of Inflatable Tensegrity Structures / Russell C., Tibert G. // International Journal of Space Structures — 2008. — Т. 23 — № 2 — P. 63–77. [Электронный ресурс]. URL: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1260/026635108785260597>.

Arutiunian Levon Anushavanovich

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia
E-mail: arutiunian.lan@students.dvfu.ru

Ovchinnikov Igor Georgievich

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia
Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin, Saratov, Russia
Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia
E-mail: bridgesar@mail.ru

Sevrunov Ivan Alexeyevich

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia
E-mail: sevrunov.ial@students.dvfu.ru

Scope of potentially implementable spatial Tensegrity systems in the construction industry. Part 2. Consideration of the construction of Tensegrity structures through the "prism of rationality"

Abstract. In this article the scope of application of self-stressed structures "Tensegrity" in the construction industry was studied. In the first part, based on the stated advantages and disadvantages, more promising areas for implementation were identified, as well as the main "attributes" by which a structure can be attributed to "Tensegrity". In this article, a list of the most feasible and "down-to-earth" structures "Tensegrity" was identified, the study of which is justified due to the possibility of their application in practice. Tower, arch, active, transforming, bridge and membrane structures were described in the course of the study. Further these constructions were analyzed through the prism of criteria "Relative simplicity of erection technology"; "Purposefulness"; "The erected construction is valuable from the point of view of architecture (visual attractiveness)". "No overspending of material in relation to the classical execution of similar structures"; "The erected structure contains a constructive justification". After that, two more promising (in terms of implementation) options were identified, which with the proper in-depth study can become widespread in civil construction. One of the main facts justifying the study of membrane "Tensegrity" is the lightness of construction and the provision of a large space without supports. Also, this type of structure has a developed technology of erection and can be constructed without the use of special equipment. However, membrane "Tensegrity" need to be refined, as they do not provide sufficient load-bearing capacity for full operation in everyday use. The main advantage of footbridges made of "Tensegrity" is "inexpressible" feeling of "levitation" when walking, also such footbridges are of special architectural value and allow you to fit more concisely such a trivial structure as a crossing to the natural environment (parks, nature reserves, etc.). Since the design is complicated by the lack of an algorithm for calculating "Tensegrity" footbridges, this topic remains relevant for further study.

Keywords: Tensegrity; architecture; construction; design; structures; self-stressed systems; compressed-stretched systems; Tensegrity modules