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

2019, №2, Том 6 / 2019, No 2, Vol 6 <https://t-s.today/issue-2-2019.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/17SATS219.pdf>

DOI: 10.15862/17SATS219 (<http://dx.doi.org/10.15862/17SATS219>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Овчинников И.И., Караханян А.Б., Овчинников И.Г. Бионический подход к проектированию мостовых сооружений. Часть 1: Особенности бионического подхода применительно к строительным конструкциям // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2019 №2, <https://t-s.today/PDF/17SATS219.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/17SATS219

For citation:

Ovchinnikov I.I., Karahanyan A.B., Ovchinnikov I.G. (2019). Bionic approach to the design of bridge structures. Part 1: Features of the bionic approach in relation to building structures. *Russian journal of transport engineering*, [online] 2(6). Available at: <https://t-s.today/PDF/17SATS219.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/17SATS219

УДК 624.04

Овчинников Илья Игоревич

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия
Доцент
Кандидат технических наук
E-mail: bridgeart@mail.ru

Караханян Артур Барменович

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», Пенза, Россия
Старший преподаватель
E-mail: artur_karahanyan@mail.ru

Овчинников Игорь Георгиевич

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия
ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия
Профессор
Доктор технических наук
E-mail: bridgesar@mail.ru

Бионический подход к проектированию мостовых сооружений. Часть 1: Особенности бионического подхода применительно к строительным конструкциям

Аннотация. Рассматриваются общие подходы к применению бионического подхода к проектированию строительных конструкций, в частности мостовых сооружений. Показывается, как развитие идей бионического проектирования повлияло на развитие конструкции мостов и рассматривается, как совершенствуются идеи бионического дизайна, создавая новый язык для будущей индустрии дизайна мостов. Отмечается, что на сегодняшний день в России проблема применения бионического подхода в проектировании мостов, несмотря на появления ряда работ является достаточно мало изученной. Кратко рассматривается история применения бионического подхода в архитектуре и строительстве. Указывается на возможность применения теории решения изобретательских задач (ТРИЗ) при использовании бионического подхода к проектированию. Приводится ряд примеров мостовых конструкций, запроектированных с применением бионического подхода, анализируются их достоинства и недостатки. Причем рассмотрены как стационарные мостовые сооружения, так и живые мосты,

меняющие свою конфигурацию в зависимости от условий эксплуатации. В заключение указывается, что, хотя исследуемая тема достаточно мало изучена в России, но это направление весьма перспективно и потому нуждается в дальнейшем развитии.

Ключевые слова: бионика; мосты; бионический подход; проектирование мостов; биомимикрия; тенсегрити системы; живые мосты

Введение

Сегодня бионика выделена в самостоятельную отрасль научного знания, и может быть источником решения современных проблем в плане применения ее идей в проектировании, мониторинге и строительстве сооружений промышленного, гражданского и транспортного назначения.

Архитектурная бионика рассматривает возможности, заложенные в живой природе, которые можно использовать в решении проблем формообразования, технического обеспечения, красоты и гармонии архитектурных форм [1]. Благодаря изучению органического мира, среди творений зодчих появились здания и сооружения, напоминающие по форме моллюсков, элементы растительного мира, фораминифер. К примеру, в Африке глинобитные дома похожи на гнездо птицы ткач, индейская хижина напоминает термитник. Более поздние примеры бионики в архитектуре созданы благодаря применению бионического подхода в структурно-функциональном, декоративном, конструктивном аспектах.

В поиске решений для строительного проектирования, биомимикрия – это альтернативное решение. Вдохновение от природы является движущей силой в архитектуре, в связи с чем мы видим появление множества новых произведений архитектуры. Биомимикрия – это новое направление для совершенствования и развития благодаря вдохновению, черпаемому от природы. Для любой конструкции здания, необходимо учитывать структурную эффективность, эффективность водопользования, безотходность работы таких систем, как тепловая среда и энергоснабжение. Биомимикрия – это направление, в рамках которого изучается совершенствование биологических организмов и развитие путем естественного отбора на протяжении миллиардов лет исследований и разработок [2]. Этот период можно рассматривать как воплощение технологий, функций и систем, решения проблем выживания в природе. Эти проблемы часто эквивалентны тем, с которыми сталкиваются люди, в процессе поиска новых способов проектирования и стабильного функционирования, и во многих случаях решения тех же задач с гораздо большей экономией средств. В данной статье мы рассматриваем развитие бионической концепции конструирования мостов в последние десятилетия, в двух основных формах: стационарные формы и подвижные формы.

Основная идея работы в том, чтобы показать, как развитие идей бионического проектирования повлияло на развитие конструкции мостов и рассматривается, как совершенствуются идеи бионического дизайна, создавая новый язык для будущей индустрии дизайна мостов. Обсуждаются основные проблемы объединения между биологией и инженерией, и представлены последние работы в каждом направлении. Таким образом, тесное многопрофильное сотрудничество может помочь инженерам создавать более устойчивые и умные структурные системы для мостов в двадцать первом веке.

В рамках разработки концепции работы мы так же задались целью показать, как развитие идей бионического проектирования повлияло на развитие эстетических качеств мостов и рассматривается, как совершенствуются идеи бионического дизайна, создавая новый язык для будущей индустрии дизайна мостов. Обсуждаются основные проблемы объединения между биологией и инженерией, и представлены последние работы в каждом направлении. Таким образом, тесное многопрофильное сотрудничество может помочь инженерам создавать более устойчивые и умные структурные системы для мостов в двадцать первом веке.

Актуальность выбранной темы состоит в том, что на сегодняшний день в России проблема применения бионического подхода в проектировании мостов, несмотря на появления ряда работ [3–9] является достаточно мало изученной. Идеям бионического проектирования за рубежом посвящены работы [10–26], а также другие публикации, ссылки на которые можно найти в указанных выше работах.

Особенности бионического подхода применительно к строительным конструкциям

1. Об основных принципах бионического подхода

Влияние биологии на инженерное проектирование развивалось в различных направлениях, но до сих пор сталкивается с новыми проблемами. Например, дерево – это классический прототип в бионических исследованиях. Ствол и несущие ветки дерева – это замечательный пример структурной оптимизации. С точки зрения морфологии, деревья подвергаются ветровой нагрузке и трансформируются в адаптированные конструктивные разновидности (рис. 1).

Рисунок 1. Биомиметрическая "карта" (источник: [27])

В устойчивой перспективе, инженеры также пытаются раскрыть разумные свойства деревьев, такие, как способность к самоадаптации, возможность самоконтроля и энергетическая эффективность, что ведет к появлению интересных устойчивых конструкций. Винсент [27; 28] разработал биомиметрическую "карту", которая объясняет переход от биологии к инженерии, как показано на рис. 1. Влияние биологии на верхнем уровне может быть более адаптивным к инженерии хотя бы потому, что конечный результат может очень сильно отличаться от прототипа, найденного в природе. Существует множество версий этой диаграммы, которые могут быть применены для решения любой проблемы в инженерном проектировании.

Если говорить о структурном проектировании, некоторые инженеры заявляют о зданиях и мостах как о масштабных техногенных конструкциях, в которых сложно достичь такой же

эффективности, как у биологических организмов. Однако, многие инженеры загорелись идеей бионического подхода и специализируются на теме развития мостостроения для будущих поколений. После веков простого заимствования геометрических признаков из природы, сегодня попытки проектирования и конструирования, предпринимаемые как архитекторами, так и инженерами, и это влияние отражается на уровне строительной механики и строительных материалов. Однако большинство конструкций до сих пор находятся на низком уровне влияния биологических объектов (тотальная мимикрия, частичная мимикрия, рассеянная), и в результате появляется довольно большое количество неуклюжих фигур, а не эффективных конструктивных решений. Для высокого уровня влияния, в рамках которого проблемы проектирования обращаются к биомиметрии, имеется гораздо меньше реализованных проектов конструкций. Логическое объяснение заключается в том, что те инженеры, которые осведомлены об идеях бионического подхода, не способны найти ощутимые ресурсы, которые могли бы глобально изменить их проекты.

2. История применения бионического подхода в архитектуре и строительстве

Парадигма биомиметрии, зародившаяся в последние два десятилетия, характеризуется трансляцией биологического влияния как мощного инструмента решения проблем. Бионический дизайн является, пожалуй, старейшей методологией в истории рукотворных сооружений на протяжении тысячи лет. В древности, образцы раннего зодчества были созданы, в большей или меньшей степени, на примере природных форм. Исторически позже, архитекторы-новаторы во главе с Антонио Гауди и Фрэнком Райтом начали активно рассматривать природу как источник для прототипов и проектов, и внедрили эту идею в большое количество своих уникальных творческих проектов. Основным недостатком бионического подхода в архитектурном проектировании заключается в том, что обычно используется только геометрический аспект биологического существа для достижения визуального сходства, без особого внимания к аспектам эффективности и экономики. Обзорные статьи о развитии бионического подхода в архитектуре могут быть найдены в работах, на которые мы уже ссылались выше.

Архитектурное проектирование и строительное проектирование – это профессии, которые имеют исторически разное толкование, даже при том, что основой обеих профессий является формирование техногенных структур. Эти различия не имели места на протяжении большей части истории, потому что до конца восемнадцатого века, две профессии существовали как одна. После промышленной революции, инженерия стала развиваться как самостоятельная дисциплина по своим собственным правилам, с научной основой, и отделялась все дальше от архитектуры. Причина, по которой история строительного дизайна не претерпевала серьезных изменений, несмотря на различия в структуре, – это поиск экономичных и производительных конструкций без потери их изящества. Структурное проектирование может рассматриваться как творческая работа через призму следующих трех принципов: экономичность, эффективность и элегантность. Проектирование мостов, в частности, это уникальная система, в рамках которой инженеры со временем заняли доминирующую роль над архитекторами и умело создают произведения искусства в рамках своей дисциплины.

Тема бионического подхода в мостостроении возникла достаточно давно. Наши предки начали строить древние мосты после того, как осознали, какие конструктивные формы используются в естественной природе для перекрытия физических преград. Фактически в природе можно найти древние прототипы всех основных типов современных форм моста (балка, арка, висячая система). Единственное отличие заключается в том, что в древности люди использовали для строительства натуральные материалы (дерево, лозу, камни, веревки), в то

время как в современных технологиях используются металл, бетон и т. п. Природные формы не напрямую используются архитекторами и дизайнерами, но это не значит, что биологические организмы не могут расцениваться как значительный ресурс, предоставляющий множество интересных проектов.

Выделяется несколько основных аспектов в природных объектах, которые могут повлиять на развитие будущих мостовых систем: геометрия, структура, кинетический механизм, энергетическая эффективность, и интеллект. Можно отметить, что применение биологических прототипов – это очень перспективный путь, позволяющий использовать бионический подход не только в традиционных стационарных формах, но и в развивающихся подвижных формах.

3. Направления применения бионического подхода в архитектуре и строительстве

Биология была источником поиска решений инженерных проблем в науке с момента возникновения жизни на земле. Дизайн и функции растений и животных менялись в процессе эволюционного отбора маленькими шажками в течение миллионов лет. В силу длительности процесса эволюции, эта тенденция естественного поиска решений не в полной мере вписывается в современные темпы научного прогресса в инженерии.

Временные рамки могут быть разными, но конструктивные ограничения и цели применения бионического подхода достаточно схожие: функциональность, оптимизация и экономичность. Поэтому, неудивительно, что машиностроение всегда черпает вдохновение в процессе изучения биологических структур и часто вдохновляются ими. Поэтому мы можем оценить их эстетические атрибуты, а также их технические характеристики и дизайн. Бионика как научная дисциплина занимается технической трансформацией и применением структур, процедур и принципов биологического развития систем.

Изначально слово «бионика» происходит от терминов «био» и техники. В наше время, это слово более широко используется для молодой междисциплинарной области исследований, которая объединяет биологию с науками технического профиля, например, архитектура и математика. Природа, с ее большим разнообразием эффективных структур, может быть использована в качестве источника стимуляции возможных экологически безопасных и эргономичных решений проблем. Примеры в природе могут стать креативным элементом в процессе поиска конструктивных решений проблемы. Правила биологической эволюции используются для определения цели и принципов функционирования структур и организаций, а также для создания модели для поиска решений.

Бионический подход может рассматриваться как сокращение разрыва между техногенным миром и природой. Существуют примеры, которые иллюстрируют, как технологические решения были разработаны на основе аналогий, или моделей биологических систем (например, липучка, Эйфелева башня и т. д.). Бионическая инженерия – это инновационное моделирование или изучение природы.

Можно сказать, что бионика – это система проектирования, основанная на поиске приемлемых для человека решений проблем и задач, используя естественные принципы. Она позволяет инженерам использовать это творчество в развитии материалов, конструкций и процессов. Многие старые изобретения берут за основу изучение естественных механизмов. Используемые структуры в природе, играют важную роль для моделирования на микро- и макроуровнях. Нет строгой процедуры для определения того, какой организм или живая система являются наиболее подходящими. Это означает, что существует потребность в разработке методологии формализации процесса.

Исторически сложилось так, что, глядя через призму бионического подхода к проектированию зданий и сооружений дизайнер видит в природе прототип, модель, которую он может использовать в той или иной мере в своей работе. Бионика делится на разные категории по разным параметрам. Например, предлагается разделять бионику на две категории: микро-бионика и макро-бионика [9]. Независимо от этой категоризации, в процессе реализации системного бионического проекта, основные объекты исследования – это живые организмы и проектные идеи. Это является важным аспектом в развитии мостостроения, с тех пор как внимание дизайнеров было обращено в сторону живых организмов.

Макро-бионический дизайн опирается преимущественно на внешний облик и на структуру прототипов в природе. Таким образом, дизайнеры могут использовать бионические идеи в разных вариациях – в формировании общей структуры, отдельных элементов моста, или связанной с мостом инфраструктуры. Зачастую в процессе проектирования современных инновационных мостов используются как статические состояния животных и растений, так и их динамические характеристики. В то же время, в процессе оптимизации эстетического облика моста, дизайнеры могут имитировать внешний облик определенных природных прототипов. В то время, как макро-аспект природного мира может вдохновить инженера в процессе проектирования, в микро-аспекте, функции и механизмы, происходящие внутри организма, могут так же быть огромным ресурсом для проектирования и оптимизации мостов.

Микро-бионическое проектирование подразумевает внедрение внутренней части системы живого организма в проект моста. Возможность живых организмов к адаптации и саморегуляции – природная концепция, используемая инженерами-мостостроителями; например, сопротивление ветровой нагрузке, сейсмоустойчивость, экологически-рациональное проектирование. Что же касается улучшения гидрологических исследований, мы можем взять за пример гидромеханику рыбы. Как в целом, так и в частных случаях, структура мостов может так же проектироваться и оптимизироваться на основе некоторых биотических функций.

В процессе бионического проектирования средового объекта можно опираться на идеи таких ученых, как В. Темнов, который отмечает важность интеграции строящегося объекта на основе социального, экологического, эстетического осмысления с учетом ресурсосбережения в аспектах полезности, прочности, красоты. При этом, форма и структура утилитарного пространства должны выбираться из соображений практичности (пользы и прочности), комфорта и художественно-эстетического качества, с позиции дизайнерского стиля [29]. Предлагая ряд расчетов, автор опирается на законы механики и строительной физики, открывающие неограниченные возможности в выборе форм и структур утилитарного пространства в процессе создания проектов, в том числе на основе бионического подхода. Этот подход позволяет не только эргономично организовать пространство, но и вложить эстетическую составляющую в дизайнерский проект. Так же важно создать такой проект, чтобы будущие конструкции не оказывали губительного влияния на окружающую природу, равно как минимизировали использование природных ресурсов для обеспечения собственной жизнеспособности.

Разработка вариантов проектных решений средового объекта с учетом его будущей функциональности, конструктивно-композиционных решений и эстетического облика может проводиться на базе успешно применяемых в практике проектирования программных комплексов: AutoCAD, ArchiCAD, Nemetschek и других современных программных средств САПР.

Для решения инженерных задач была разработана теория решения изобретательских задач (далее по тексту – ТРИЗ) – область знаний о механизмах развития технических систем и методах решения изобретательских задач [30–35]. Автор – Генрих С. Альтшуллер (псевдоним Г. Альтов), родившийся в бывшем Советском Союзе в 1926 году. Его первое изобретение было

сделано в возрасте 14 лет – для подводного плавания. Это его хобби натолкнуло его на продолжение карьеры в качестве инженера-механика. Служа в военно-морском флоте в качестве патентного эксперта в 1940-е годы, он осуществлял помощь изобретателям в подаче заявок на патенты. Однако он обнаружил, что часто к нему обращаются для оказания помощи в решении проблем.

Интерес к поиску стандартных методов для решения проблем привел его к новой разработке. В течение следующих нескольких лет, Г.С. Альтшуллер изучил более 200 000 патентов в поиске изобретательских задач, а также методов их решения. Г.С. Альтшуллер классифицировал патенты определенным, новым способом. Вместо их классификации по отраслям, таким как автомобильной, аэрокосмической и т. д., он убрал из классификации предмет, чтобы сделать акцент на раскрытии процесса решения проблем. Он обнаружил, что часто та же проблема была решена снова и снова, используя один из лишь сорока основных принципов инновационного подхода. Позже, благодаря этой классификации, изобретатели перед тем, как разрабатывать определенную тему получили возможность быстрого и эффективного поиска патентных решений. В последнее время развитие исследований ТРИЗ заключалось в том, что много усилий было направлено на развитие распространения ТРИЗ для более широкого применения. На сегодняшний день, несколько инструментов ТРИЗ уже оказались одинаково эффективными в решении проблемы. Примерами этого являются АРИЗ и 40 изобретательских принципов, которые применяются во многих новых областях, таких как: бизнес, управление качеством, и другие. Это явно свидетельствует о целесообразности использования ТРИЗ в других областях, и перспективном будущем развитии ТРИЗ. С помощью ТРИЗ можно увеличить количество вариантов решения проблем сотрудничества во многих отраслях промышленности.

ТРИЗ – это отличный инструмент для инженеров, исследователей, менеджеров и т. д., который может помочь им в решении проблем. Бионическое инженерное моделирование и вдохновение от законов природы в поиске решения проблем могут использоваться совместно с ТРИЗ.

На основе методологии ТРИЗ разрабатывается схема, предназначенная для того, чтобы помочь в поисках технических принципов проектирования и решения технических задач в условиях ограниченности инвестиционных возможностей. Именно в рамках комплексного подхода может быть предложена необходимая методология, заключающая в себе и модели и подходы к решению задач.

Хотя нет необходимости для моста проводить синтез ЭКО-архитектуры, экологическое состояние моста нельзя игнорировать как в городах, так и в пригородах. Экологичный вид, защита окружающей среды и экономия ресурсов должны быть глубоко внедрены в сознание каждого инженера-мостостроителя. Удачная схема должна быть благоприятной для планирования охраны окружающей среды; в противном случае неправильное использование может привести к ненужной трате ресурсов. Во время строительства, мы должны использовать как можно больше местных материалов или вторсырья. Мы также должны уделять внимание использованию и трансформации существующих мостов, а не их сносу и реконструкции. В целом жизненный цикл, меры по энергосбережению должны быть приняты во внимание. В устройстве мостового дренажа, вентиляции и освещения, солнечная энергия и энергия ветра должны быть использованы в полной мере, благодаря чему будет спасено много ресурсов. Эта идея должна быть использована не только в период строительства, но и в течение всего жизненного цикла.

Сейчас, может быть, рано говорить о всех ее возможностях, однако имеющийся практический опыт в этом направлении у нас и за рубежом открывает широкие горизонты решения различных интересных архитектурных проблем с помощью патентов живой природы.

Здесь и возможности поиска новых, функционально оправданных архитектурных форм, отличающихся красотой и гармонией, и создание новых рациональных конструкций с одновременным использованием удивительных свойств строительного материала живой природы, и открытие путей реализации единства конструирования и создания архитектурных средств с использованием энергии солнца, ветра, космических лучей. Но, пожалуй, наиболее важным ее результатом может быть активное участие в создании условий сохранения живой природы и формировании гармоничного ее единства с архитектурой [1].

Стремление к комфорту, уюту и безопасности присуще человечеству с давних времен. Энергосберегающие строения, строения, вырабатывающие энергию – перспективы развития бионики. Уже сегодня есть ряд патентов, предлагающих систему самообеспечения, саморегулирования мостовых конструкций.

С развитием информационных компьютерных технологий, совершенствованием измерительной техники, появляется возможность создания систем непрерывного мониторинга сооружений как на строящихся, так и на эксплуатируемых объектах. Система непрерывного мониторинга позволяет в течение длительного времени получать информацию о напряженно-деформированном состоянии мостового сооружения, об обрабатываемых нагрузках, различных воздействиях и других показателях эксплуатации сооружения и принимать эффективные решения по управлению его эксплуатацией [36; 37]. Применение системы непрерывного мониторинга состояния сооружения позволяет фиксировать условия работы и поведение мостового сооружения практически непрерывно. Поэтому внештатные или пиковые воздействия, такие как землетрясения, ураганные порывы ветра, проход сверхнормативной нагрузки и т. п. вместе с соответствующими изменениями в условиях работы сооружения будут зарегистрированы. Важным преимуществом системы непрерывного мониторинга мостового сооружения является то, что в процессе мониторинга происходит накопление реальных данных о нагрузках и воздействиях, об условиях работы конструкции, которые могут быть эффективно использованы для повышения надежности и увеличения сроков и эффективности эксплуатации других сооружений, а также и при научных исследованиях, проектировании и разработке нормативных документов.

В будущем создаваемые системы непрерывного мониторинга состояния сооружений могут получать со спутников, самолетов и наземных баз изображения и данные о погоде, грузонапряженности, дорожной ситуации и реакции сооружения на эти воздействия, смогут обобщать и предоставлять в графическом виде данные для рассмотрения их координаторами в режиме реального времени, с целью более эффективного управления человеческими и материальными ресурсами, противодействия внешним воздействиям. Системы непрерывного мониторинга состояния транспортных сооружений могут быть подключены к объединенным информационным системам, которые позволят должностным лицам и инженерам анализировать накопленные и только что полученные данные для более полного анализа ситуации [37].

Геометрия, структура, механизмы, использование энергии, интеллект являются основными аспектами в природе, которые способны предложить инженерам основу для развития инновационных систем в промышленном и мостовом строительстве. Степень успешности от внедрения бионического подхода в будущие проекты зависит от мультидисциплинарного подхода.

На сегодняшний день стратегия развития внедрения бионического подхода в проектировании и строительстве инновационных структурных систем формирует серьезную базу для развития в будущем. Природа – это прекрасный учитель, который предоставляет неисчерпаемое количество загадок для человечества, но вряд ли можно найти научные исследования, изучающие «Записи природы». Переходя от бессознательного к сознательному,

будущие инженеры будут в уникальном положении, ставя перед собой цель, заключающуюся в строительстве моста в будущем столетии, переводя мостостроение на качественно новый этап развития. Внедрение бионики представляет собой большой прорыв, тем самым открывая исследователю возможность воспринимать мост не только как неодушевленный предмет, что крайне важно. И хотя немаловажно использовать в мостостроении предыдущий опыт, но можно добиться более эффективных и результатов, если учиться у природы.

Учитывая все бионические идеи, кратко рассмотренные выше, эти понятия могут быть применены не только в проектировании мостов, но также во всех аспектах современного мостостроения, таких как планирование, реализация, мониторинг, предупреждение стихийных бедствий и смягчение их последствий и т. д. Проблема, с которой сегодня столкнулись инженеры, заключается в том, что они не знают, как использовать наработанные знания. Как упоминалось ранее, неважно какая бионическая концепция является нашей конечной целью, чтобы решить существующие проблемы необходимо исследование тенденций в развитии интеллектуального мостостроения. Несмотря на трудности в будущем, с развитием технологий, а также при использовании мультидисциплинарного подхода, все эти трудности будут преодолены.

4. Примеры мостовых конструкций, запроектированных с применением бионического подхода

Традиционно, мостовое проектирование – это все же классическая постоянная проблема поиска рациональных путей пересечения существующих дорог и рек. Лучшие в истории проекты мостов считаются образцами архитектурного искусства, потому что они демонстрируют пример хорошего баланса между экономией, эффективностью и изяществом.

Не случайно, конструктивные разновидности в природе так же объединяются по этим трем признакам, начиная от ствола растений до скелета животных. Результаты изучения природных форм натолкнули архитекторов и инженеров на мысль, использованную в ряде последних проектов пешеходных мостов. Некоторые архитекторы понимали преимущества использования бионического подхода как возможности улучшить внешний вид или эстетическую ценность пешеходных мостов, но это привело к тенденции определения структурных форм архитекторами, которая ведет к несдержанности в проектировании пешеходных мостов. На рис. 2a,b приведены два примера мостов в Сингапуре: моста Хендерсона и моста на основе структуры молекулы ДНК [9]. И хотя оба моста стали достоянием общественности, но частичная мимикрия геометрической формы из природы привела к некоторой неуклюжести проектов, имеющих сложную конструкцию и большую цену. Следовательно, эффективность и экономичность этих проектов сомнительны. Пешеходный мост Чуньхуа (на рис. 2c) в Шеньчжэне (Китай) скопировал форму цветка, но по сравнению со стандартными проектами этот проект экономически неэффективен.

Еще один пример проекта, вызвавшего дискуссию – это «мост Мира» Сантьяго Калатравы в Калгари (рис. 2d). Вдохновила на такую конструкцию моста то ли структура елочки, то ли конструкция дождевого червя. Этот проект был подвергнут критике обществом за то, что он слишком современен для старинного стиля центра города. Учитывая тот факт, что большинство инженеров не способны опираться на вдохновение, цель бионических исследований заключается в попытке создать базу данных возможных инженерных решений, таких, как иллюстрированное руководство по морфологии цветущих растений используется для изучения форм растений.

Рисунок 2. Использование бионического подхода в мостостроении сегодня (изображения с сайта <http://photo-bonus.ru/?p=12062>)

Эффективные природные конструкции характеризуются оптимальным распределением материалов в изящной форме. Изучение истории множества мостов и их конструкции позволяет заключить, что существуют два важных условия, необходимых для рождения шедевра – это понимание структурных принципов и эффективное использование материалов. За последние десятилетия некоторые выдающиеся инженеры стали более близко знакомыми с бионическими принципами, так что ряд мостов был построен под влиянием механических законов природы. Например, сдвоенные наклонные стальные арки, представляющие собой поддерживающую систему моста-бабочки (рис. 3а) были спроектированы по мотивам крыльев бабочки, при этом подвески похожи на прожилки в крыле бабочки. По контрасту, драконий мост (рис. 3b) – пример полной мимикрии формы драконообразного скелета, структура которого – это система из перекладин и колонн под настилом. Сантьяго Калатрава [34] – это широко известный архитектор, использующий бионический подход в своей работе. Как и у его предшественника, испанского коллеги – архитектора Антонио Гауди, множество проектов Калатравы почерпнули свои прототипы в структуре растений и животных. Главная несущая балка моста Campro Valantin повторяет форму позвоночника (рис. 3с), в то время как пилон Струнного моста (рис. 3d) был создан на примере ноги.

Инновации в конструкции уверенно ведут к применению новых материалов. История демонстрирует, что новые материалы начинают использоваться тогда, когда фаза замещения успешно пройдена и имеет место конструктивный процесс через переход к новому материально-ориентированному структурному концепту. Продвинутые строители сначала используют новые материалы в старых формах: литое железо в деревянных арках, сталь в деревянных фермах и армированный бетон в каменных арках. Но со временем структурные решения начинают все больше адаптироваться к свойствам новых материалов, что повышает эффективность их использования.

Рисунок 3. Примеры проектов мостов с применением бионического подхода к конструированию (изображения с сайта <http://photo-bonus.ru/?p=12062>)

На рис. 4 показано два примера новых структурных решений в рамках бионического подхода. Мост, пересекающий реку Дуглас в Ланкашире (рис. 4а) направил биомиметрические исследования в сторону развития инновационных легких структур с небольшими элементами из стали и «герметичными воздушными балками». Идея этой конструкции была почерпнута от из наблюдения над тургором – внутренним давлением внутри листьев, которое создает самоподдерживаемые конструкции.

Рисунок 4. Проекты новых структурных решений в рамках бионического подхода (изображения с сайта <http://photo-bonus.ru/?p=12062>)

Другой интересный пример (рис. 4b) имеет структуру, состоящую из серии пересекающихся спиралей. Дизайнеры объединили спиральную форму стручка дерева Типуанатипу и прямолинейную сетку, увиденную в *Euplectella* как мостовое покрытие. Спирали также отражают цвета деревьев, светятся таким образом, чтобы сливаться с окружающей средой. Отмечено, что оптимизированная структура в будущих проектах мостов должна использовать целесообразные материально-адаптированные формы.

Энергетические затраты в техногенных конструкциях всегда имели большую важность. Будущие мосты могут так же играть важную роль, что касается устойчивости и использования зеленой энергии. «Зеленые» мосты проектируются для того, чтобы уменьшить глобальное влияние техногенной среды на природу. Идея «работы на природной энергии» должна быть использована не только в период конструирования, но также и распространяться на весь жизненный цикл. Фотоэлектрические солнечные панели, например, могут быть установлены на мосту таким образом, чтобы обеспечивать стабильное использование электричества. Проект реконструкции моста Блэкфэйр через Темзу сделал этот старый мост выдающейся достопримечательностью, как видно на рисунке 5. Мощности, производимые фотоэлектрическими панелями на крыше, могут обеспечить общее потребление электроэнергии станцией Блэкфэйрс. Насущная проблема развития мостов в будущем заключается в том, как оптимально использовать энергию природы. Стабильно возникающие проблемы принимаются в расчет при планировании мостов.

Рисунок 5. Солнечные батареи на мосту Blackfairs
(изображения с сайта <http://photo-bonus.ru/?p=12062>)

В "Уилкинсон Аэро Архитектс" в 2002 году разработан проект ботанического моста в проходе к университету в Ньюкастле, который организывает экологическое пространство по верху моста, как показано на рис. 6а. Этот мост спроектирован так, чтобы минимизировать использование материалов и перерабатываемых природных ресурсов.

На рис. 6b изображен интересный проект установки ветряков между мостовыми опорами в местах концентрации шквального ветра. Важно так же отметить, что будущие мосты могут так же иметь multifunctional возможности производства энергии, не только для потребления, но и для добычи, энергопоглощения и хранения.

По сравнению с большинством стационарных форм, существует и другая интересная тема в проектировании мостов, – это проектирование мостов подвижных форм, которое опирается на идею использования кинетических механизмов в природе. Подвижные мосты представляют собой экономичный путь для транспортировки в целях пересечения активных водных путей, предоставляющих проход с маленьким вертикальным просветом. Можно выделить три доминирующих типа подвижных мостов – разводной, поворотный и подъемный. Примеры подвижных мостов всех типов фактически представляют собой не только уникальные механизмы, но также являются иллюстрацией самоприспосабливающегося пути в природе.

Рис. 7 представляет Паддингтонский сворачивающийся мост с пролетом 12,9 м, который обслуживает и пешеходов, и пересекаемое препятствие весьма интересным образом.

Рисунок 6. Проекты дружественных природе мостов (изображения с сайта <http://photo-bonus.ru/?p=12062>)

Хотя дизайнеры могут не полностью соглашаться с утверждением, что структура, похожая на скользящее насекомое, его форма и принципы организации соответствуют биологическому виду. Если инженеры могут попробовать привлечь принципы кинематики из природы во время этапа концептуального проектирования, то управляющие механизмы в движущихся мостах могут быть сформированы более точно. Один из примеров (рис. 8) – это мост «Gateshead Millenium» в Ньюкастле. Проектировщики выбрали нетрадиционный открытый способ адаптации моста к судоходству по реке. Другой пример на рис. 9 – «живой» мост Кейлхорн, у которого три сегмента удерживаются кабелями, когда он открывается для движения транспорта по каналу.

Рисунок 7. Паддингтонский сворачивающийся мост (изображения с сайта <http://photo-bonus.ru/?p=12062>)

Рисунок 8. Гейтсхед, мост "Миллениум"
(изображения с сайта <http://photo-bonus.ru/?p=12062>)

Рисунок 9. Откидной мост Кейлхорн
(изображения с сайта <http://photo-bonus.ru/?p=12062>)

К интересным направлениям в конструировании движущихся мостов относится использование раздвигаемых форм и систем тенсегрити.

Раздвигаемые структуры в наше время играют важную роль как в военных, так и во вспомогательных операциях при чрезвычайных ситуациях. Представляют интерес такие прототипы конструкция малого веса, как раздвигаемый мост и раздвигаемое укрытие (рис. 10).

Тенсегрити системы – это пространственные структуры, состоящие из компонентов, работающих только на сжатие или растяжение, находящиеся в самоуравновешенном положении за счет предварительного напряжения [38–40]. Такая концепция в последнее время уже используется в проектировании мостов (см. рис. 11).

Рисунок 10. Концепция применения раздвигаемой структуры в конструировании (изображения с сайта <http://photo-bonus.ru/?p=12062>)

Рисунок 11. Концепция моста "тенсегриту" (изображения с сайта <http://photo-bonus.ru/?p=12062>)

Согласно биомиметрической карте Винсента, случаи, описанные ранее, служат примерами механического уровня инспирации. В частности, такие пешеходные мосты представляют собой более удобный путь, нежели стационарные пешеходные мосты для перекрытия реки.

Развитие интеллектуальных мостов является другой обнадёживающей целью в проектировании активных мостов в ближайшем будущем. Переход от «пассивного» моста к «активному» с помощью изучения окружающего мира – это огромный прорыв для интеллектуальных конструкций будущего [41]. Основные движущие факторы эпохи информационных технологий (такие, как нанотехнологии, микроэлектроника и биотехнологии) будут поддерживать развитие «умных» мостовых конструкций и материалов.

Интересный проект моста Инненхафт на рис. 12 иллюстрирует случай внедрения в обычную подвесную конструкцию «интеллекта». Это адаптивная форма, подчиненная различным условиям экологии и обслуживания транспортной системы.

Рисунок 13. Мост "Инненхафт" (изображения с сайта <http://photo-bonus.ru/?p=12062>)

В ближайшем будущем умные мосты должны будут иметь способность к самоконтролю, самонастройке и даже к самовосстановлению.

Заключение

Анализируя применение бионического подхода в мостостроении, можно сделать вывод: что бионика – это интересное направление развития инженерной мысли во всем мире. На сегодняшний день бионика занимает важное место среди современных наук, получая все более междисциплинарный характер. Говоря о претворении идей бионического проектирования в жизнь нельзя не отметить, что в последние годы появляется все больше зданий, сооружений и их проектов с применением бионического подхода во всем мире, и иногда на территории России. Это помогает разнообразить городской ландшафт, уйти от стандартных типовых решений, принятых за норму во всем мире.

К сожалению, бионика на сегодняшний день еще не заняла полагающееся ей по праву место в архитектуре современных городов России. Более того, исследуемая тема достаточно мало изучена в России. Но это направление весьма перспективно и потому нуждается в дальнейшем развитии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лебедев Ю.С., Рабинович В.И., Положай Е.Д. и др. Архитектурная бионика. Под ред. Ю.С. Лебедева. – М.: Стройиздат, 1990. 269 с.
2. Караханян А.Б., Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Тимофеев В.В. Развитие основных принципов проектирования транспортных сооружений. Использование биомиметического подхода // Транспортные сооружения, 2017 №3, <https://t-s.today/PDF/02TS317.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
3. Овчинников И.Г., Караханян А.Б. Применение бионического подхода к проектированию пешеходных мостов // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. Материалы международной научно-практической конференции. Изд-во ПНИПУ г. Пермь, 23–24 апреля 2015 г., с. 430–436.
4. Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Караханян А.Б. Пешеходные мосты современности: тенденции проектирования. Часть 1. Использование бионического подхода // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №2 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/81TVN215.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/81TVN215.
5. Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Караханян А.Б. Современные тенденции в проектировании пешеходных мостов // Дороги и мосты. РосдорНИИ. 2015. Вып. 33. с. 177–194.
6. Овчинников И.Г., Караханян А.Б., Овчинников И.И., Моисеев О.Ю. Некоторые тенденции развития пешеходного мостостроения // Зауральский научный вестник. 2015. №1(7). с. 69–76.
7. Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Караханян А.Б. Перспективные направления проектирования на примере современных пешеходных мостов // Инновационный транспорт. №3. Сентябрь 2015. С. 73–79.
8. Овчинников И.И., Караханян А.Б., Овчинников И.Г. Применение бионического подхода при создании пешеходных мостов из высокопрочных бетонов // СБОРНИК Тезисов докладов международной научно-технической конференции «Высокопрочные цементные бетоны: технологии, конструкции, экономика (ВПБ-2016)». – Казань: КГАСУ, 2016. – 92 с. с. 60.
9. Современные пешеходные и велосипедные мосты (основные концепции проектирования и примеры): моногр. / И.И. Овчинников, А.Б. Караханян, И.Г. Овчинников, Ю.П. Скачков. – Пенза: ПГУАС, 2018. – 140 с.
10. Bonser, R.H.C. Patented biologically-inspired technological innovations a twenty-year view [Text] / R.H.C. Bonser // Journal of Bionic Engineering. – 2006. – №3. – P. 39–41.
11. Knippers, J. Design and construction principles in nature and architecture [Text] / J. Knippers, T. Speck // Bioinspir Biomim. – 2012. – №7. – P. 1–10.
12. Bionic Architecture, Forms and Constructions [Text] / Sadri Mehdi [etc.] // Research Journal of Recent Sciences. – 2014. – March. – Vol. 3(3). – P. 93–98.
13. Aldersey-Williams H. Towards biomimetic architecture. Nat Mater. 2004. 3(5). p. 277–279.
14. Bar-Cohen Y. Nature as a model for mimicking and inspiration of new technologies. Int. J Aeronaut Space Sci. 2012. 13(1): p. 1–13.

15. Bhushan B. Biomimetics: lessons from nature—an overview. *Philos. Trans Roy Soc. A Math Phys. Eng. Sci.* 2009. 367(1893): p. 1445–1486.
16. Ario I., Nakazawa M., Tanaka Y., Tanikura I., Ono S. Development of a prototype deployable bridge based on origami skill. *Autom. Constr.* 2013. 32: p. 104–111.
17. Helms M., Vattam S.S., Goel A.K. Biologically inspired design: process and products. *Des. Stud.* 2009. 30(5): p. 606–622.
18. Liu K, Jiang L. Bio-inspired design of multiscale structures for function integration. *Nano Today.* 2011. 6(2): p. 155–175.
19. Mak T.W., Shu L.H. Using descriptions of biological phenomena for idea generation. *Res Eng Des.* 2008. 19(1): p. 21–28.
20. Santulli C., Langella C. Introducing students to bio-inspiration and biomimetic design: a workshop experience. *Int. J Technol. des Educ.* 2011. 21(4): p. 471–485.
21. Shu L.H., Ueda K., Chiu I., Cheong H. Biologically inspired design. *CIRP Ann Manuf. Technol.* 2011. 60(2): p. 673–693.
22. Trotta M.G. Bio-inspired design methodology. *Int. J Inform Sci.* 2001. 1(1): p. 1–11.
23. Chen P-Y., McKittrick J., Meyers M. Biological materials: functional adaptations and bioinspired designs. *Prog. Mater. Sci.* 2012. 57: p. 1492–1704.
24. Aldersey-Williams H. Towards biomimetic architecture. *Nature materials*, 2004, 3, p. 277–279.
25. Knippers J., Speck T. Design and construction principles in nature and architecture. *Bioinspired Biomim*, 2012, 7, p. 1–10.
26. Maglic, Michael J., "Biomimicry: Using Nature as a Model for Design". Masters Theses 1896 – February 2014, Paper 871.
27. Vincent J.F.V. Stealing ideas from nature, in *Deployable Structure*, ed. by Pellegrino S., Springer, Vienna, Austria, 2001.
28. Vincent J.F.V., Bogatyreva O.A., Bogatyrev N.R., Bowyer A., Pahl A.K. Biomimetics: Its practice and theory. *Journal of the Royal Society Interface*, 2006, 3, p. 471–482.
29. Темнов, В.Г. Конструктивные системы в природе и строительной технике [Текст] / В.Г. Темнов. – Л.: Стройиздат, 1987. 256 с.
30. Альтшуллер Г.С. Найти идею. Введение в ТРИЗ – теорию решения изобретательских задач. Пльпина Паблишер. 2014.
31. Альтов Г.С., Верткин И.М. Как стать гением. Жизненная стратегия творческой личности. 1994.
32. Альтов Г.С. И тут появился изобретатель. Задачи на смекалку и сообразительность. 2000.
33. Альтшуллер Г.С. Творчество как точная наука. М. Советское радио. 1979.
34. Альтшуллер Г.С. Алгоритм изобретения. М. Московский рабочий. 1973.
35. Альтшуллер Г.С. Как научиться изобретать. Тамбов. Книжное издательство. 1961.
36. Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Нигаматова О.И., Михалдыкин Е.С. Прочностной мониторинг мостовых сооружений и особенности его применения.

- Часть 1. Международный и отечественный опыт применения мониторинга // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», Том 1, номер 1 (2014), с. 1–32. <http://t-s.today/PDF/01TS114.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
37. Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Нигаматова О.И., Михалдыкин Е.С. Прочностной мониторинг мостовых сооружений и особенности его применения. Часть 2. Непрерывный мониторинг состояния мостовых сооружений // Интернет-журнал «Транспортные сооружения» Том 1, No 2 (2014), с. 1–37. <http://t-s.today/PDF/01TS214.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
38. 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.
39. 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/04TS217.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/04TS217.
40. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Буреев А.К. Применение принципа тенсегрити для создания мостовых конструкций. Часть 2. Примеры мостов-тенсегрити // 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.
41. Ковырягин М.А., Овчинников И.Г. Управляемые конструкции (в мостостроении) (монография). Изд-во СГТУ. Саратов, 2003. 95 с.

Ovchinnikov Ilya Igorevich

Industrial university of Tyumen, Tyumen, Russia
Yuri Gagarin state technical university of Saratov, Saratov, Russia
E-mail: bridgeart@mail.ru

Karahanyan Artur Barmenovich

Penza state university of architecture and construction, Penza, Russia
E-mail: artur_karahanyan@mail.ru

Ovchinnikov Igor Georgievich

Industrial university of Tyumen, Tyumen, Russia
Perm national research polytechnic university, Perm, Russia
E-mail: bridgeasar@mail.ru

Bionic approach to the design of bridge structures. Part 1: Features of the bionic approach in relation to building structures

Abstract. General approaches to the application of bionic approach to the design of building structures, in particular bridge structures are considered. It is shown how the development of bionic design ideas influenced the development of bridge design and how the ideas of bionic design are improved, creating a new language for the future bridge design industry. It is noted that today in Russia the problem of bionic approach in the design of bridges, despite the appearance of a number of works is little studied. Briefly describes the history of the use of the bionic approach in architecture and construction. The possibility of applying the theory of inventive problem solving (TRIZ) when using a bionic approach to design is indicated. A number of examples of bridge structures designed using the bionic approach are given, their advantages and disadvantages are analyzed. Moreover, both stationary bridge structures and living bridges that change their configuration depending on the operating conditions are considered. In conclusion, it is pointed out that, although the topic under study is rather poorly studied in Russia, but this direction is very promising and therefore needs further development.

Keywords: bionics; bridges; bionic approach; bridge design; biomimicry; tensegrity systems; living bridges

REFERENCES

1. Lebedev Yu.S., Rabinovich V.I., Polozhay E.D. and etc. (1990). *Arkhitekturnaya bionika. [Architectural Bionics.]* Moscow: Stroyizdat, p. 269.
2. Karakhanyan A.B., Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Timofeev V.V. (2017). Development of the basic principles for designing transport structures. Use of the biomimetic approach. *Russian journal of transport engineering*, [online] 3(4). Available at: <http://t-s.today/PDF/02TS317.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/02TS317
3. Ovchinnikov I.G., Karakhanyan A.B. (2015). *Primenenie bionicheskogo podkhoda k proektirovaniyu peshekhodnykh mostov. [Applying a bionic approach to the design of pedestrian bridges.]* Perm: Publishing house Perm National Research Polytechnic University, pp. 430–436.
4. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Karakhanyan A.B. (2015). Pedestrian Bridges: modern trends design. Part 1. Using the bionic approach. *Naukovedenie*, [online] 2(7). Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/81TVN215.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/81TVN215.

5. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Karakhanyan A.B. (2015). Current trends in the design of pedestrian bridges. *Roads and bridges. RosdornII*, 33, pp. 177–194 (in Russian).
6. Ovchinnikov I.G., Karakhanyan A.B., Ovchinnikov I.I., Moiseev O.Yu. (2015). Some trends in the development of footbridge construction. *Zauralsky Scientific Bulletin*, 1(7), pp. 69–76 (in Russian).
7. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Karakhanyan A.B. (2015). Perspective design directions on the example of modern pedestrian bridges. *Innovative transport*, 3, pp. 73–79 (in Russian).
8. Ovchinnikov I.I., Karakhanyan A.B., Ovchinnikov I.G. (2016). *Primenenie bionicheskogo podkhoda pri sozdanii peshekhodnykh mostov iz vysokoprochnykh betonov. [The use of bionic approach in the creation of pedestrian bridges of high strength concrete.]* Kazan: Kazan University of Architecture and Construction, p. 92, p. 60.
9. Ovchinnikov I.I., Karakhanyan A.B., Ovchinnikov I.G., Skachkov Yu.P. (2018). *Sovremennye peshekhodnye i velosipednye mosty (osnovnye kontseptsii proektirovaniya i primery). [Modern pedestrian and bicycle bridges (basic design concepts and examples).]* Penza: Penza State University of Architecture and Construction, p. 140.
10. Bonser R.H.C. (2006). Patented biologically-inspired technological innovations a twenty-year view. *Journal of Bionic Engineering*, 3, pp. 39–41.
11. Knippers J. (2012). Design and construction principles in nature and architecture. *Bioinspir Biomim*, 7, pp. 1–10.
12. Sadri Mehdi (2014). Bionic Architecture, Forms and Constructions. *Research Journal of Recent Sciences*, 3(3), pp. 93–98.
13. Aldersey-Williams H. (2004). Towards biomimetic architecture. *Nat Mater*, 3(5), pp. 277–279.
14. Bar-Cohen Y. (2012). Nature as a model for mimicking and inspiration of new technologies. *Int. J Aeronaut Space Sci.*, 13(1), pp. 1–13.
15. Bhushan B. (2009). Biomimetics: lessons from nature—an overview. *Philos. Trans Roy Soc. A Math Phys. Eng. Sci.*, 367(1893), pp. 1445–1486.
16. Ario I., Nakazawa M., Tanaka Y., Tanikura I., Ono S. (2013). Development of a prototype deployable bridge based on origami skill. *Autom. Constr.*, 32, p. 104–111.
17. Helms M., Vattam S.S., Goel A.K. (2009). Biologically inspired design: process and products. *Des. Stud.*, 30(5), pp. 606–622.
18. Liu K, Jiang L. (2011). Bio-inspired design of multiscale structures for function integration. *Nano Today*, 6(2), pp. 155–175.
19. Mak T.W., Shu L.H. (2008). Using descriptions of biological phenomena for idea generation. *Res Eng Des.*, 19(1), pp. 21–28.
20. Santulli C., Langella C. (2011). Introducing students to bio-inspiration and biomimetic design: a workshop experience. *Int. J Technol. des Educ.*, 21(4), pp. 471–485.
21. Shu L.H., Ueda K., Chiu I., Cheong H. (2011). Biologically inspired design. *CIRP Ann Manuf. Technol.*, 60(2), pp. 673–693.
22. Trotta M.G. (2001). Bio-inspired design methodology. *Int. J Inform Sci.*, 1(1), pp. 1–11.
23. Chen P-Y., McKittrick J., Meyers M. (2012). Biological materials: functional adaptations and bioinspired designs. *Prog. Mater. Sci.*, 57, pp. 1492–1704.
24. Aldersey-Williams H. (2004). Towards biomimetic architecture. *Nature materials*, 3, pp. 277–279.

25. Knippers J., Speck T. (2012). Design and construction principles in nature and architecture. *Bioinspired Biomim*, 7, pp. 1–10.
26. Maglic, Michael J. (1896). Biomimicry: Using Nature as a Model for Design. *Masters Theses*, p. 871.
27. Vincent J.F.V. (2001). *Stealing ideas from nature*, in *Deployable Structure*. Vienna, Austria: ed. by Pellegrino S., Springer.
28. Vincent J.F.V., Bogatyreva O.A., Bogatyrev N.R., Bowyer A., Pahl A.K. (2006). Biomimetics: Its practice and theory. *Journal of the Royal Society Interface*, 3, pp. 471–482.
29. Temnov V.G. (1987). *Konstruktivnye sistemy v prirode i stroitel'noy tekhnike*. [Constructive systems in nature and construction equipment.] Leningrad: Stroiizdat, p. 256.
30. Al'tshuller G.S. (2014). *Nayti ideyu. Vvedenie v TRIZ – teoriyu resheniya izobretatel'skikh zadach*. [Find an idea. Introduction to TRIZ – Theory of Inventive Problem Solving.] Moscow: Pplina Publishers.
31. Al'tov G.S., Vertkin I.M. (1994). *Kak stat' geniem. Zhiznennaya strategiya tvorcheskoy lichnosti*. [How to become a genius. The life strategy of a creative person.]
32. Al'tov G.S. (2000). *I tut poyavilsya izobretatel'. Zadachi na smekalku i soobrazitel'nost'*. [And then the inventor appeared. Tasks on sharpness and ingenuity.]
33. Al'tshuller G.S. (1979). *Tvorchestvo kak tochnaya nauka*. [Creativity as an exact science.] Moscow: Soviet Radio.
34. Al'tshuller G.S. (1973). *Algoritm izobreteniya*. [Algorithm of the invention.] Moscow: Moscow worker.
35. Al'tshuller G.S. (1961). *Kak nauchit'sya izobretat'*. [How to learn to invent.] Tambov: Book Publishers.
36. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Nigamatova O.I., Mikhaldykin E.S. (2014). Strength monitoring of bridge constructions and features of its application. Part 1. International and domestic experience of monitoring application. *Russian journal of transport engineering*, [online] 1(1). Available at: <http://t-s.today/PDF/01TS114.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/01TS114.
37. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Nigamatova O.I., Mikhaldykin E.S. (2014). Strength monitoring of bridge constructions and features of its application. Part 2. Continuous monitoring of bridge construction status. *Russian journal of transport engineering*, [online] 2(1). Available at: <http://t-s.today/PDF/01TS214.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/01TS214.
38. Bureev A.K., Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G. (2016). *Primenenie struktur tensegriti v arkhitekture i mostostroenii*. [The use of Tensegrity structures in architecture and bridge construction.] Khabarovsk: Pacific State University Publishing House, p. 404, pp. 200–206. ISBN: 978-5-7389-1894-0.
39. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Bureev A.K. (2017). Application of a tensegrity principle for creating bridge structures. Part 1. The "tensegrity" system overview. *Russian journal of transport engineering*, [online] 2(4). Available at: <http://t-s.today/PDF/04TS217.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/04TS217.
40. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Bureev A.K. (2017). Application of a tensegrity principle for creating bridge structures. Part 2. The "tensegrity" system overview. *Russian journal of transport engineering*, [online] 3(4). Available at: <http://t-s.today/PDF/01TS317.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/01TS317.
41. Kovryagin M.A., Ovchinnikov I.G. (2003). *Upravlyaemye konstruksii (v mostostroenii) (monografiya)*. [Managed structures (in bridge building) (monograph).] Saratov: Publishing House of Saratov State Technical University, p. 95