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

2019, №3, Том 6 / 2019, No 3, Vol 6 <https://t-s.today/issue-3-2019.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/34SATS319.pdf>

DOI: 10.15862/34SATS319 (<http://dx.doi.org/10.15862/34SATS319>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Караханян А.Б., Овчинников И.И., Овчинников И.Г. Бионический подход к проектированию мостовых сооружений. Часть 2: Конечно-элементное моделирование арочного пешеходного моста, спроектированного с использованием бионического подхода // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2019 №3, <https://t-s.today/PDF/34SATS319.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/34SATS319

For citation:

Karahanyan A.B., Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G. (2019). Bionic approach to design of bridge structures. Part 2: Finite-element modeling of an arch pedestrian bridge designed using the bionic approach. *Russian journal of transport engineering*, [online] 3(6). Available at: <https://t-s.today/PDF/34SATS319.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/34SATS319

УДК 624.04

Караханян Артур Барменович

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

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

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 2: Конечно-элементное моделирование арочного пешеходного моста, спроектированного с использованием бионического подхода

Аннотация. Отмечается, что на сегодняшний день в России проблема применения бионического подхода в проектировании мостов, несмотря на появления ряда работ является достаточно мало изученной и нуждающейся в дальнейшем развитии. Кратко рассматриваются основные нагрузки на мостовые сооружения и особенности расчета мостов. Указывается, что проблеме корректного определения нагрузок и воздействий практически не уделяется должного внимания. Обсуждаются особенности метода расчета по предельным состояниям и обращается внимание на то, что метод не учитывает, что сооружения в большинстве случаев достигают предельного состояния не из-за увеличения нагрузки, а из-за неправильно запроектированных размеров сечения, из-за изменения механических характеристик

материалов под влиянием внешней среды, из-за появления и развития дефектов и повреждений как распределенного, так и локального характера. Также указывается на то, в методе деформационный расчет практически отделен от прочностного расчета и имеет место нестыковка используемых при этом гипотез.

Далее в статье приводятся примеры применения бионического подхода к проектированию арочных пешеходных мостов и обсуждается идея экологически рационального проектирования.

В заключительной части рассматривается задача конечно-элементного моделирования пешеходного арочного моста с наклонными арками (моста – бабочки), запроектированного с использованием бионического подхода. Для расчета использован программный комплекс «Midas Civil». Приводятся эпюры напряжений, перемещений от различных сочетаний нагрузок.

Указывается, что использование бионического подхода при проектировании мостовых сооружений имеет большой потенциал в плане создания интересных изобретений, тем более, что эта отрасль инженерного проектирования является очень мало изученной, инновационной сферой научных интересов для большого количества инженеров, исследователей, ученых в наши дни. Бионическое проектирование – это эффективный инструмент поиска новых решений мостовых сооружений.

Ключевые слова: бионика; мосты; бионический подход; экологически рациональное проектирование мостов; биомимикрия; арочный мост; конечно-элементное моделирование

Введение

В первой части настоящей статьи [1] 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 [2–10] является достаточно мало изученной. В то же время за рубежом идея применения бионического подхода находит весьма широкое применение как к строительным, так и к мостовым конструкциям [11–29].

Далее в статье [1] 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.

1. Немного о нагрузках на мостовые сооружения и особенностях расчета мостовых сооружений

Весьма важным этапом при разработке проекта мостового сооружения является этап определения различных нагрузок и других воздействий на него.

При этом нагрузки и воздействия, принимаемые при расчетах мостов, подразделяются на постоянные и временные. К основным постоянным нагрузкам относят собственный вес конструкции, силы предварительного натяжения, давление от веса грунта на устои. К основным временным относятся нагрузки от проходящих по мосту транспортных средств и пешеходов: вертикальные подвижные нагрузки, горизонтальные поперечные нагрузки от центробежной силы и боковых ударов подвижной нагрузки, горизонтальные продольные нагрузки от торможения подвижной нагрузки, давление грунта от подвижного состава. Кроме основных видов нагрузки, на мосты могут оказывать действие прочие нагрузки: ветровые, ледовые, от навала судов, строительные, сейсмические, от воздействия температуры среды и морозного пучения грунтов. Вообще говоря, нагрузки – это достаточно важный элемент сложившейся системы изучения мостовых сооружений. Нагрузки достаточно сильно изменчивы во времени и пространстве.

Расчетные схемы, применяемые для расчетного анализа и проектирования мостовых сооружений, имеют некоторую условность. Поэтому правильнее говорить не столько о нагрузках на изучаемый объект, сколько о воздействиях на сооружение. Принятый в настоящее время практически повсеместно метод расчета по предельным состояниям пользуется понятиями нормативной и расчетной нагрузки. Нагрузка, которая определяется нормами проектирования, в какой-то мере соответствующая наибольшей нагрузке, которая может быть допущена в процессе эксплуатации сооружения – является нормативной. Нормы определяют, что проверка первого предельного состояния реализуется при расчетных значениях нагрузок, а проверка второго предельного состояния – при нормативных значениях.

Нагрузки и воздействия по своему происхождению имеют самую разнообразную природу, однако при всем своем многообразии, имеют некоторые общие элементы, которые позволяют говорить об анализе нагрузок и воздействий как об определенном едином целом. В основе такого анализа лежит теория надежности, а также основы статики и динамики мостовых конструкций. С помощью этих методов анализа и происходит выбор расчетных значений нагрузок и воздействий, их моделирование в расчетах мостовых конструкций, определение реакции сооружения на внешние воздействия и оценка особенностей взаимодействия конструкции с нагрузкой.

Одним из примеров взаимодействия нагрузки с мостовым сооружением является аэродинамическое нагружение. Его величина достаточно сильно зависит от формы конструкции, обтекаемой ветровым потоком, и если деформации конструкции эту форму заметно меняют, как это случается, например, в висячих системах, то меняются и действующие нагрузки.

Аналогичная положительная обратная связь возникает при учете нагрузки от собственного веса, а также в случаях нагружения гибких конструкций весом слоя жидкости. Прогибы конструкции увеличивают толщину слоя жидкости в середине пролета, что заметно меняет схему нагружения.

Практически все нагрузки, которые рассматриваются при расчете конструкций, являются случайными величинами или случайными функциями времени. Это, в числе прочего, означает, что мы не можем указать точное значение нагрузки, которое будет реализовано, а используем некоторые расчетные величины, которые могут реализоваться лишь с определенной долей вероятности.

Еще одна система оценки надежности сооружений, в том числе, мостовых, обозначается в рамках метода предельных состояний, который так же называют "методом частных коэффициентов надежности". При расчете по предельным состояниям важно помнить, что в расчет берется какое-либо одно из предельных состояний, например, предел прочности, и мы

только лишь определяем максимально допустимые нагрузки, не говоря о том, какие нормативные нагрузки будут регулярно сопровождать конструкцию. Метод частных коэффициентов, в свою очередь, позволяет рассматривать общий коэффициент запаса через произведение нескольких частных коэффициентов, обычное состояние которых резко отличается степенью близости к предельному. Рассматривая исключительно предельные состояния, мы в большинстве ситуаций рассматриваем только экстремальную нагрузку, без учета более низкого реально действующего уровня нагрузок. Предельные состояния первой группы – это предельные состояния, которые ведут к полной непригодности к эксплуатации конструкций, оснований, или к полной (частичной) потере несущей способности зданий и сооружений в целом. Иными словами, эта формулировка предполагает не только физический, но и моральный (экономический) износ.

Так как подавляющее большинство мостовых сооружений изготавливается из железобетона, то рассмотрим особенности метода предельных состояний при анализе железобетонных конструкций.

Согласно методу предельных состояний, при расчете железобетонных конструкций исследуется поведение опасного сечения на действие предельной нагрузки. При использовании этого метода задается характер эпюр напряжений в бетоне и арматуре, характерные точки которых определяются из одного уравнения равновесия, другое уравнение равновесия сечения (уравнение моментов) используется для проверки соответствия несущей способности сечения по изгибу и момента, возникающего в этом сечении от внешних нагрузок. Предельным считается такое состояние, когда усилия от внешних нагрузок соответствуют несущей способности сечения. При таком подходе предполагается, что предельное состояние наступает вследствие приложения к нагружаемому элементу опасной нагрузки.

Метод предельных состояний был введен в СССР в качестве руководящего принципа расчета строительных конструкций 1 января 1955 года. В дальнейшем этот метод получил широкое признание в мире и в настоящее время положен в основу стандарта ИСО (ISO ST 2394. General Principles on Reliability for Structures. – Zurich: ISO, 1994. – 50 p.) и системы Еврокодов (ENV 1991-1. Eurocode-1: Basis of Design and Action on Structures. Part 1: Basis of Design. – Brussels: CEN, 1994. – 106 p.), правда под названием «метод частных коэффициентов надежности».

В основе метода лежит идея отказа от детального анализа всех состояний конструкций, кроме предельных, по отношению к которым и формулируются расчетные требования к рассчитываемой конструкции. С точки зрения методологии частных коэффициентов надежности произошла замена одного общего коэффициента запаса системой нескольких (частных) коэффициентов, связанных с отдельными сторонами проблемы безопасности конструкции (характером нагрузки, свойствами материала, степенью ответственности сооружения...).

Но анализ только предельных состояний конструкции приводит к тому, что рассматриваются в основном экстремальные нагрузки, а закономерности поведения конструкции при более низких уровнях нагрузок остаются неизвестными.

Здесь следует отметить три важных момента.

Во-первых, проблеме определения несущей способности железобетонных конструкций посвящена значительная часть курса железобетонных конструкций, в то время как проблеме корректного определения нагрузок и воздействий практически не уделяется должного внимания. Основным источником данных о нагрузках являются нормы проектирования, в которых не дается никаких пояснений, но по установившейся привычке расчетчиков безоговорочно доверять нормам, приводимые в них данные полагаются непогрешимыми.

Во-вторых, данный подход совершенно не учитывает того факта, что сооружения в большинстве случаев достигают предельного состояния не из-за увеличения нагрузки, а из-за неправильно запроектированных размеров сечения, из-за изменения механических характеристик материалов под влиянием внешней среды, из-за появления и развития дефектов и повреждений как распределенного, так и локального характера. Также возможной причиной наступления предельного состояния может служить разброс механических характеристик материалов, нагрузки и параметров внешней среды.

В-третьих, в методе расчета по предельным состояниям деформационный расчет железобетонных конструкций практически отделен от прочностного расчета, причем если в прочностном расчете материал арматуры и бетона в сжатой зоне сечения предполагается находящимся в пластичном состоянии, то в деформационном расчете этот же материал предполагается упругим. Такая нестыковка гипотез о характере деформирования материалов расчетчиков длительное время не смущала.

Можно сказать, что нормируемые расчеты на прочность по модели предельного состояния не вписываются в концепцию контроля железобетонных конструкций в эксплуатационной стадии, так как они контролируют работу элементов железобетонных конструкций в практически никогда не реализуемой ситуации и носят характер оценки предельных (интегральных) возможностей сечений этих конструкций.

Такой расчет имеет смысл в инженерной практике, но ему нужно придать иной характер – он реализуется только один–два раза в жизни конструкции, когда выполняются испытания опытного образца с доведением конструкции до разрушения. Необходимость в таком перерасчете может возникнуть при анализе аварийной ситуации, когда потребуется выявить ее причины и установить фактическую прочность материала в момент аварии.

Но выполнение расчета по предельным состояниям на действие эксплуатационных нагрузок и других эксплуатационных воздействий – это введение в заблуждение инженера о возможных в эксплуатации режимах работы конструкций. Другими словами, если при расчете по предельным состояниям полагается, что это состояние реализуется путем достижения нагрузкой некоторой предельной величины при неизменных других внешних воздействиях, то в реальных условиях эксплуатации «предельное» состояние наступает вследствие изменения формы конструкции, размеров сечений конструкции и свойств ее материала под влиянием условий эксплуатации.

Поэтому, с нашей точки зрения, расчеты железобетонных конструкций в эксплуатационной стадии должны учитывать кинетику происходящих деградационных процессов, и те изменения расчетной схемы, к которым приводят и эти процессы, и другие эксплуатационные повреждения.

В последнее время для расчета железобетонных конструкций активно начинает применяться деформационный подход, согласно которому прочностная и деформационная стороны задачи расчета конструкций взаимосвязаны. Но для учета указанных выше особенностей процессов деформирования железобетонных конструкций к известным трем сторонам задачи расчета конструкций – статической (связанной с определением усилий в конструкции от действующих нагрузок), геометрической (связанной с установлением зависимостей между перемещениями и деформациями в точках конструкций, а также с обеспечением неразрывности этих деформаций), физической (связанной с определением зависимости между напряжениями и деформациями или между усилиями и перемещениями), добавляются еще уравнения, описывающие кинетику процессов взаимодействия конструкций и составляющих их материалов с внешними воздействиями (в частности – агрессивными внешними средами и полями), зависимости, связывающие характеристики материалов

конструкции с параметрами внешних воздействий и уравнения, описывающие развитие повреждений того или иного вида, приводящих к постепенному разрушению конструкции.

С учетом того, что все характеристики материалов, геометрических параметров конструкций, действующих на конструкции нагрузок, имеют определенный разброс, характер которого изменяется с течением времени, возникает задача моделирования поведения конструкций во времени с учетом происходящих в конструкции процессов. Для решения задач подобного вида наиболее подходящей методологией с нашей точки зрения является сочетание подхода, основанного на использовании деформационных моделей с вероятностными характеристиками входящих в них переменных и параметров с методом статистического моделирования (методом Монте-Карло).

2. Примеры применения бионического подхода к проектированию арочных пешеходных мостов

Природа, с ее большим разнообразием эффективных структур, может быть использована в качестве источника стимуляции возможных экологически безопасных и эргономичных решений задачи проектирования. Примеры в природе могут стать креативным элементом в процессе поиска конструктивных решений этой задачи.

В процессе бионического проектирования средового объекта можно опираться на идеи таких ученых, как В. Темнов [30], который отмечает важность интеграции строящегося объекта на основе социального, экологического, эстетического осмысления с учетом ресурсосбережения в аспектах полезности, прочности, красоты (по Витрувию). При этом форма и структура утилитарного пространства должны выбираться из соображений практичности (пользы и прочности), комфорта и художественно-эстетического качества, с позиции дизайнерского стиля [31]. Предлагая ряд расчетов, В. Темнов 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 минимизировать использование природных ресурсов для обеспечения собственной жизнеспособности.

Таким образом, мы приходим к идеям экологически рационального проектирования. Различные ученые включают в понятие экологически рационального проектирования разные компоненты, и, таким образом, складывается общее понимание, что человек старается максимально воспользоваться полезными свойствами природы, и в то же время не навредить окружающей среде.

Взаимодействие моста и окружающей среды – как природной, так и городской – одна из главных архитектурно-художественных проблем мостостроения [32].

Далее на ряде примеров рассмотрим применение концепций бионического проектирования с точки зрения архитектурной эстетики. Очень часто архитекторы руководствуются ассоциативным подходом как методикой проектирования, использующей за основу проецирование материально-конструктивных и художественно-образных качеств природных форм для создания архитектурного объекта [30]. Таким образом, мы видим популярную в среде мостового проектирования форму бабочки, представленную, например, мостами через реку Уз в Бедфорде, через каналы Копенгагена, а так же проектные идеи студентов-архитекторов, в рамках одного из этапов курсовой работы, техническое задание для

которых звучит как "Преобразование био-формы в геометрию" в рамках курса "Ассоциативный метод преобразования природной формы в модель архитектурного объекта" [10] (рис. 1).

Рисунок 1. Примеры мостов с применением бабочки в качестве прототипа (изображения с сайта <http://photo-bonus.ru/?p=12062>)

Так же популярный прототип, часто используемый в практике мостостроения – ДНК. На рисунке 2 приведены примеры следующих мостов: Helix Bridge в Сингапуре, проект моста Nahne River Landscape bridge (витой ДНК-мост, Китай), а также концепция моста ДНК, разработанная в Киеве как сочетание стилизованных элементов, воспроизводящих живую природу [10].

Рисунок 2. Примеры мостов с применением ДНК в качестве прототипа (изображения с сайта <http://photo-bonus.ru/?p=12062>)

В последнее время в мировой инженерной практике часто применяется термин «Sustainable design», что в русском языке нашло свою аналогию в термине «экологически

рациональное проектирование», то есть проектирование мостовых сооружений с учетом их влияния на окружающую среду и максимальная экономия используемых ресурсов [4; 5]. При этом должны быть учтены даже и видеоэкологические аспекты, то есть мостовое сооружение не должно нарушать гармонию окружающей среды и вносить диссонанс в ее восприятие.

В качестве еще одного примера рассмотрим проект одного из висячих пешеходных мостов системы DSSH как перехода между домами компании Sanzpont. DSSH расшифровывается как Dynamic Shape Shifting Helix (рис. 3), то есть динамическая формоизменяющая спираль. Основная характеристика, описывающая мост – сверхгибкость. В связи с этим происходит реакция на перемещение пешеходов, благодаря чему достигается живой эффект. Этот проект воплощает один из мейнстримов современного строительства и архитектуры – стремление к гармонии с природой и максимальной экологичности любого проявления жизнедеятельности человека. Преимущество моста заключается в возможности самостоятельной выработки электроэнергии благодаря установленным на его поверхности компактным гибким фотогальваническим солнечным батареям, которые способны снабжать электроэнергией все системы моста, в том числе и трёхцветную светодиодную подсветку. Система энергоснабжения моста абсолютно безопасна для окружающей среды и экологична. Для очистки атмосферы от вредных примесей на мосту в специальных контейнерах будут размещены разнообразные растения, которые располагаются на нижнем этаже моста.

Рисунок 3. Проект моста *Dynamic Shape Shifting Helix* (фото с сайта <http://bridge-design-space.blogspot.ru/2012/01/dynamic-shapeshifting-helix-bridge.html>)

Эффектно этот мост выглядит и ночью. Этот эффект достигнут благодаря применению подсветки с помощью энергоэкономных светодиодных микро-светильников, которые встроены в различные элементы конструкции. Такая подсветка придает мосту невероятное очарование в ночное время. С конструктивной точки зрения мост будет выполнен на гибком каркасе, обтянут гибким материалом и в результате будет способен подстраиваться под внешние воздействия. Точнее, мост включает внешнюю спираль, растягиваемую мембрану, внутреннюю спираль и прохаживающую часть, и он способен растягиваться, реагируя на перемещения проходящих по нему людей, как бы превращаясь в бионическую конструкцию.

В конечном счете, целью архитектора и инженера в процессе проектирования может стать живая саморегулируемая структура, обеспечивающая свое функционирование и жизнедеятельность на 100 процентов, и даже самостоятельно вырабатывающая ресурсы. На сегодняшний день уже разрабатываются технологии мостов, которые позволяют не только потреблять солнечную энергию мостом, вырабатывать ее с помощью солнечной батареи, но и накапливать ее в специальных аккумуляторах.

Художественно-выразительные формы могут быть использованы архитекторами и инженерами-мостостроителями в качестве инструмента для эмоционального воздействия на человека. Таким образом, бионика, как современное направление дизайна, становится скорее необходимой для применения в архитектурных проектах, в том числе, мостовых. Архитектура все чаще разговаривает с людьми на языке природы. Нельзя не отметить, что бионическое формообразование – весьма перспективное и малоизученное в нашей стране направление, эволюционирующее с каждым новым проектом.

3. Конечно-элементное моделирование пешеходного арочного моста с наклонными арками (моста – бабочки)

В данном разделе решается задача численного анализа напряженно-деформированного состояния арочного пешеходного моста, запроектированного с использованием бионического подхода. Такой мост, установленный на городской территории, может стать в определенном роде визитной карточкой городского района и привлекать внимание горожан.

Мост состоит из однопролетной цельнометаллической балки и двух трубобетонных арок, расположенных наклонно под углом 45° к горизонтальной плоскости (рис. 7–9). Мост расположен на вертикальной кривой, радиусом 300 м, уклоны на подходах составляют 4 ‰. Мост рассчитан на пешеходную нагрузку и пропуск спецтехники (временная вертикальная нагрузка $P = 400 \text{ кгс/м}^2$).

Рассчитываемое мостовое сооружение имеет габарит Г-3,0 м. Полная длина моста составляет 29,00 м. Полная ширина моста составляет 3,3 м. Для расчета применялся, конечно, элементный программный комплекс «MidasCivil».

В программе MidasCivil моделируется конструкция пролетного строения, состоящего из балки жесткости индивидуального проектирования коробчатого типа с наклонными стенками, двух арок, вант-подвесок (стальных кручёных канатов), соединяющих балку жесткости с арками.

Параметры арки приняты следующими: пролет – 29,00 м, стрела подъема – 5 м.

Сечение и толщина стенок арки, а также других элементов моста определяются в процессе расчета, путем последовательных итераций, по окончании которых будет подобрано оптимальное сечение арок (рис. 4–6).

Расчетная модель содержит 1145 стержневых элементов и 548 узлов.

Глобальная ось «X» модели совпадает с продольной осью балок. Ось «Y» перпендикулярна оси «X» и лежит в горизонтальной плоскости. Ось «Z» направлена в верх. Локальные оси «X» направлены от начального узла элемента к конечному узлу. Локальные оси «Y» перпендикулярны оси «X» и лежат в горизонтальной плоскости. Ось «Z» направлена в верх.

Все конструкции загружены только собственным весом. Подсчет величин нагрузок производится автоматически по площади поперечного сечения элементов. Временная пешеходная нагрузка принята в соответствии с нормами СП 35.133300.2011 «Мосты и трубы».

В расчетах рассмотрены два варианта поперечного сечения балки пролетного строения: 1 вариант – пролетное строение коробчатого типа с наклонными стенками высотой 1700 мм, шириной 3300 мм; 2 вариант – пролетное строение коробчатого типа с наклонными стенками высотой 1150 мм, шириной 3300 мм. В первом варианте по высоте стенки располагается два ребра жесткости, а во втором варианте – одно ребро жесткости.

Расчетная модель мостового сооружения с балкой пролетного строения по первому варианту представлена на рисунках 7–9. На рисунке 10 приведены фрагменты несущих элементов мостового сооружения по первому варианту. Схема нагружения постоянной нагрузкой от собственного веса мостового сооружения, запроектированного по первому варианту представлена на рисунке 11, а схема нагружения ветровой нагрузкой на сооружение – на рисунке 12. Схема загрузки части мостового сооружения пешеходной нагрузкой показана на рисунке 13. На рисунках 14–17 приведены результаты расчета пролетного строения мостового сооружения, запроектированного по первому варианту в виде клеенок напряжений. На рисунках 18 и 19 приведено распределение изгибающего момента в несущих элементах мостового сооружения от действия как постоянных, так и сочетания постоянных и временных нагрузок. На рисунке 20 показаны опорные реакции, действующие на сооружение.

Геометрические характеристики сечения главной балки пролетного строения по второму варианту приведены на рисунке 21.

Расчетная модель мостового сооружения с балкой пролетного строения по второму варианту представлена на рисунке 22. На рисунках 23–26 приведены результаты расчета пролетного строения мостового сооружения, запроектированного по второму варианту в виде клеенок напряжений. На рисунках 27 и 28 приведено распределение изгибающего момента в несущих элементах мостового сооружения по второму варианту от действия как постоянных, так и сочетания постоянных и временных нагрузок. На рисунке 29 показаны опорные реакции, действующие на сооружение.

Рисунок 4. Геометрические характеристики сечения арки моста
(1 вариант – прямоугольная труба 300х400 мм) (составлено авторами)

Section ID: 5

Name: ГБ

General Section

Built-Up Section

Section Properties		
Area	2.72579e+003	cm ²
Asy	1.41120e+003	cm ²
Asz	6.90159e+002	cm ²
Ixx	7.24705e+004	cm ⁴
Iyy	1.23740e+007	cm ⁴
Izz	4.95627e+007	cm ⁴
Cyp	189.3540	cm
Cym	189.3380	cm
Czp	60.2806	cm
Czm	114.7190	cm
Qyb	13665.1659	cm ³
Qzb	10887.5046	cm ³
Peri.O	1.97452e+003	cm
Peri.I	0.00000e+000	cm
Cent.y	189.3380	cm
Cent.z	114.7190	cm
y1	-164.0610	cm

Import SEC Files...

FEM ☐ Equation ☒

Consider Shear Deformation ☒

Consider Warping Effect(7th DOF) ☐

Offset: Center-Top

Change Offset...

Show Calculation Results... OK Cancel Apply

Рисунок 5. Геометрические характеристики сечения главной балки пролетного строения (1 вариант – пролетное строение коробчатого типа с наклонными стенками, высотой 1700 мм, шириной 3300 мм) (составлено авторами)

Material ID: 2

Name: 1SHSND

Type of Design: Steel

Type of Material: ☒ Isotropic ☐ Orthotropic

Steel

Standard: GOST-SP(S)

DB: 1SHSND

Concrete

Standard:

Code:

DB:

Steel

Modulus of Elasticity: 2.1006e+006 kgf/cm²

Poisson's Ratio: 0.3

Thermal Coefficient: 6.6667e-006 1/[F]

Weight Density: 0.00785 kgf/cm³

Use Mass Density: 8.005e-006 kgf/cm³/g

Concrete

Modulus of Elasticity: 0.0000e+000 kgf/cm²

Poisson's Ratio: 0

Thermal Coefficient: 0.0000e+000 1/[F]

Weight Density: 0 kgf/cm³

Use Mass Density: 0 kgf/cm³/g

Plasticity Data

Plastic Material Name: NONE

Thermal Transfer

Specific Heat: 0 Btu/kg°F[F]

Heat Conduction: 0 Btu/cm²hr°F[F]

Damping Ratio: 0.02

OK Cancel Apply

Рисунок 6. Механические характеристики материала (составлено авторами)

Рисунок 7. Модель рассчитываемого мостового сооружения (составлено авторами)

Рисунок 8. Модель рассчитываемого искусственного сооружения (вид сверху) (составлено авторами)

Рисунок 9. Модель рассчитываемого искусственного сооружения (вид с торцевой стороны) (составлено авторами)

Рисунок 10. Фрагмент несущих элементов конструкции (составлено авторами)

Рисунок 11. Фрагмент постоянной нагрузки на сооружении (мостовое полотно) (составлено авторами)

Рисунок 12. Фрагмент приложения временной нагрузки на сооружение (ветровая нагрузка) (составлено авторами)

Рисунок 13. Схема расположения временной пешеходной нагрузки на пролетном строении для определения усилий в элементе 129

Загружение части путепровода временной распределенной вертикальной пешеходной нагрузкой в середине пролета.

Рисунок 14. Распределение напряжений в несущих элементах сооружения от действия постоянных нагрузок (наибольшее усилие в элементе 79 равно 1314.1 кг/см²) (составлено авторами)

Рисунок 15. Распределение напряжений в несущих элементах сооружения от действия постоянных нагрузок и временных вертикальных пешеходных нагрузок (наибольшее усилие в элементе 121 равно 2130.5 кг/см²) (составлено авторами)

Рисунок 16. Распределение напряжений в несущих элементах сооружения от действия постоянных нагрузок (наибольшее усилие в элементе 145 равно 67.4 кг/см^2) (составлено авторами)

Рисунок 17. Распределение напряжений в несущих элементах сооружения от действия постоянных нагрузок и временных вертикальных пешеходных нагрузок (наибольшее усилие в элементе 145 равно 168.0 кг/см^2) (составлено авторами)

Рисунок 18. Распределение момента M в несущих элементах сооружения от действия постоянных нагрузок (наибольшее усилие в элементе 121 равно 636.5 тм) (составлено авторами)

Рисунок 19. Распределение момента M в несущих элементах сооружения от действия постоянных нагрузок и временных вертикальных пешеходных нагрузок (наибольшее усилие в элементе 129 равно 1274.2 тм) (составлено авторами)

Рисунок 20. Опорные реакции (составлено авторами)

Рисунок 21. Геометрические характеристики сечения главной балки пролетного строения (2 вариант – пролетное строение коробчатого типа с наклонными стенками, высотой 1150 мм, шириной 3300 мм) (составлено авторами)

Рисунок 22. Модель рассчитываемого искусственного сооружения по варианту 2 (вид со стороны главной балки) (составлено авторами)

Рисунок 23. Распределение напряжений в несущих элементах сооружения (вариант 2) от действия постоянных нагрузок и временных вертикальных пешеходных нагрузок (наибольшее усилие в элементе 75 равно 1444.5 кг/см^2) (составлено авторами)

Рисунок 24. Распределение напряжений в несущих элементах сооружения (вариант 2) от действия постоянных нагрузок и временных вертикальных пешеходных нагрузок (наибольшее усилие в элементе 121 равно 2919.2 кг/см^2) (составлено авторами)

Рисунок 25. Распределение напряжений в несущих элементах сооружения (вариант 2) от действия постоянных нагрузок и временных вертикальных пешеходных нагрузок (наибольшее усилие в элементе 145 равно 107.6 кг/см^2) (составлено авторами)

Рисунок 26. Распределение напряжений в несущих элементах сооружения (вариант 2) от действия постоянных нагрузок и временных вертикальных пешеходных нагрузок (наибольшее усилие в элементе 145 равно 257.9 кг/см^2) (составлено авторами)

Рисунок 27. Распределение момента M в несущих элементах сооружения (вариант 2) от действия постоянных нагрузок (наибольшее усилие в элементе 121 равно 575.1 тм) (составлено авторами)

Рисунок 28. Распределение момента M в несущих элементах сооружения от действия постоянных нагрузок и временных вертикальных пешеходных нагрузок (наибольшее усилие в элементе 129 равно 1004.5 тм) (составлено авторами)

Рисунок 29. Опорные реакции (вариант 2) (составлено авторами)

Как видно, результатом выполненных расчетов в Midas Civil является получение необходимой информации о напряженно-деформированном состоянии всех конструкций моста. При расчете на подвижные нагрузки отображаются линии и поверхности влияния, а также схемы нагружения подвижными нагрузками. Выводятся данные о деформированном виде расчетной модели, реакциях в опорах, усилия и напряжения в расчетных сечениях элементов.

На основе полученных в ходе расчета данных, можно сделать вывод о правильности принятия проектных решений и эффективности расходования материалов на мостовое сооружение, и, как следствие, эффективности возможных капиталовложений.

Заключение

В приводимой ниже таблице проводится сопоставление максимальных напряжений в балке пролетного строения, в ванте, а также в арке для двух вариантов поперечного сечения балки (напомним, 1 вариант – пролетное строение коробчатого типа с наклонными стенками высотой 1700 мм, шириной 3300 мм; 2 вариант – пролетное строение коробчатого типа с

наклонными стенками высотой 1150 мм, шириной 3300 мм; в первом варианте по высоте стенки располагается два ребра жесткости, а во втором варианте – одно ребро жесткости.

Таблица

Сопоставление максимальных напряжений в различных элементах

	Элемент	Вид нагрузки	Вариант 1	Вариант 2
Максимальное напряжение, кг/см ²	Балка	Постоянная	1314.1	1494.5
Максимальное напряжение, кг/см ²	Балка	Постоянная + временная	2130.5	2919.2
Максимальное напряжение, кг/см ²	Вант	Постоянная	67.4	107.2
Максимальное напряжение, кг/см ²	Вант	Постоянная + временная	168	257.9
Максимальное напряжение, кг/см ²	Арка	Постоянная	566.5	663
Максимальное напряжение, кг/см ²	Арка	Постоянная + временная	821	839.6

Как видно, во втором варианте напряжения в вантах и балке пролетного строения значительно превышают таковые для случая первого варианта, при этом отличие в напряжениях в арке отличаются на значительно меньшую величину. Однако конструкция мостового сооружения в обоих вариантах является довольно своеобразной, так как при ее проектировании использовался макробионический подход, согласно которому форма сооружения напоминает по своему виду бабочку с распахнутыми крыльями. Понятно, что можно даже для данного проекта мостового сооружения проанализировать множество различных сочетаний параметров балки пролетного строения, очертания и сечения арок, угла их наклона, рисунка вантового заполнения арочной плоскости и выбрать наиболее эффективный как с точки зрения расхода материала, так и точки зрения эстетики [33; 34].

Однако в данной работе это не являлось целью исследования. Мы просто показали, что использование бионического подхода позволяет запроектировать и с использованием современных программных комплексов рассчитать довольно сложные мостовые конструкции, использующие в качестве прообраза конструкции объектов живой природы.

Использование бионического подхода при проектировании мостовых сооружений имеет большой потенциал в плане создания интересных изобретений, тем более, что эта отрасль инженерного проектирования является очень мало изученной, инновационной сферой научных интересов для большого количества инженеров, исследователей, ученых в наши дни. Мы считаем, что бионическое проектирование – это эффективный инструмент поиска новых решений мостовых сооружений.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Лебедев Ю.С., Рабинович В.И., Положай Е.Д. и др. Архитектурная бионика. Под ред. Ю.С. Лебедева. – М.: Стройиздат, 1990. 269 с.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
 6. 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.
 7. 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.
 8. 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.
 9. 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.
 10. 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.
 11. 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.
 12. Knippers, J. Design and construction principles in nature and architecture [Text] / J. Knippers, T. Speck // Bioinspir Biomim. – 2012. – №7. – P. 1–10.
 13. Bionic Architecture, Forms and Constructions [Text] / Sadri Mehdi [etc.] // Research Journal of Recent Sciences. – 2014. – March. – Vol. 3(3). – P. 93–98.
 14. Aldersey-Williams H. Towards biomimetic architecture. Nat Mater. 2004. 3(5). p. 277–279.
 15. 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.
 16. Bhushan B. Biomimetics: lessons from nature – an overview. Philos. Trans Roy Soc. A Math Phys. Eng. Sci. 2009. 367(1893): p. 1445–1486.
 17. 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.
 18. Helms M., Vattam S.S., Goel A.K. Biologically inspired design: process and products. Des. Stud. 2009. 30(5): p. 606–622.
 19. Liu K., Jiang L. Bio-inspired design of multiscale structures for function integration. Nano Today. 2011. 6(2): p. 155–175.

20. Mak T.W., Shu L.H. Using descriptions of biological phenomena for idea generation. *Res Eng Des.* 2008. 19(1): p. 21–28.
21. 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.
22. Shu L.H., Ueda K., Chiu I., Cheong H. Biologically inspired design. *CIRP Ann Manuf. Technol.* 2011. 60(2): p. 673–693.
23. Trotta M.G. Bio-inspired design methodology. *Int. J. Inform Sci.* 2001. 1(1): p. 1–11.
24. Chen P-Y., McKittrick J., Meyers M. Biological materials: functional adaptations and bioinspired designs. *Prog. Mater. Sci.* 2012. 57: p. 1492–1704.
25. Aldersey-Williams H. Towards biomimetic architecture. *Nature materials*, 2004, 3, p. 277–279.
26. Knippers J., Speck T. Design and construction principles in nature and architecture. *Bioinspired Biomim*, 2012, 7, p. 1–10.
27. Maglic, Michael J., "Biomimicry: Using Nature as a Model for Design". Masters Theses 1896 – February 2014, Paper 871.
28. Vincent J.F.V. Stealing ideas from nature, in *Deployable Structure*, ed. by Pellegrino S., Springer, Vienna, Austria, 2001.
29. 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.
30. Темнов, В.Г. Конструктивные системы в природе и строительной технике [Текст] / В.Г. Темнов. – Л.: Стройиздат, 1987. 256 с.
31. Овчинников И.Г., Инамов Р.Р., Бахтин С.А., Овчинников И.И. Висячие и вантовые мосты: эстетические проблемы. Учеб пособие. Саратов: Саратов. Гос. Техн. ун-т. 2002. 107 с.
32. Темнов В.Г. Принятие конструктивных решений при проектировании искусственной среды обитания // Актуальные вопросы совершенствования системы высшего профессионального образования: сб. науч. трудов № 2. СПб.: Невский институт управления и дизайна, 2010. С. 183–191.
33. Горбачева И.А., Овчинников И.И., Овчинников И.Г. Исследование применимости постулатов мостовой эстетики к задаче проектирования мостов // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», Том 4, №4 (2017) <https://t-s.today/PDF/12TS417.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/12TS417. С. 1–27.
34. Овчинников И.И., Горбачева И.А., Овчинников И.Г. Влияние инноваций на эстетику мостовых сооружений // Транспортные сооружения, 2019 №1, <https://t-s.today/PDF/01SATS119.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/01SATS119.

Karahanyan Artur Barmenovich

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

Ovchinnikov Ilya Igorevich

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

Ovchinnikov Igor Georgievich

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

Bionic approach to design of bridge structures. Part 2: Finite-element modeling of an arch pedestrian bridge designed using the bionic approach

Abstract. It is noted that today in Russia the problem of applying the bionic approach in the design of bridges, despite the appearance of a number of works, is little studied and needs to be further developed. Briefly discusses the main loads on bridge structures and features of the calculation of bridges. It is indicated that practically no attention is paid to the problem of correctly determining loads and impacts.

The features of the calculation method for limiting states are discussed and attention is paid to the fact that the method does not take into account that structures in most cases reach the limiting state not because of an increase in load, but because of improperly designed section sizes, due to changes in the mechanical characteristics of materials under the influence of the environment, due to the appearance and development of defects and damage, both distributed and local in nature.

It is also indicated that in the method the deformation calculation is practically separated from the strength calculation and there is a discrepancy in the hypotheses used in this case.

The rest of the article gives examples of applying the bionic approach to the design of arch pedestrian bridges and discusses the idea of sustainable design.

In the final part, we consider the problem of finite element modeling of a pedestrian arch bridge with inclined arches (butterfly bridge), designed using the bionic approach. For the calculation, the Midas Civil software package was used. Plots of stresses, displacements from various combinations of loads are given.

It is indicated that the use of the bionic approach in the design of bridge structures has great potential in terms of creating interesting inventions, especially since this branch of engineering design is a very little studied, innovative area of scientific interest for a large number of engineers, researchers, scientists today. Bionic design is an effective tool for finding new solutions for bridge structures.

Keywords: bionics; bridges; bionic approach; sustainable design of bridges; biomimicry; arch bridge; finite element modeling

REFERENCES

1. Ovchinnikov I.I., Karakhanyan 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.
2. Lebedev Yu.S., Rabinovich V.I., Polozhay E.D. and etc. (1990). *Arkhitekturnaya bionika. [Architectural Bionics.]* Moscow: Stroyizdat, p. 269.
3. 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.
4. Ovchinnikov I.G., Karakhanyan A.B. (2015). *Primenenie bionicheskogo podkhoda k proektirovaniyu peshekhodnykh mostov. [Application of the bionic approach to the design of pedestrian bridges.]* Perm: Publishing House Perm National Research Polytechnic University, pp. 430–436.
5. 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.
6. 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).
7. Ovchinnikov I.G., Karakhanyan A.B., Ovchinnikov I.I., Moiseev O.Yu. (2015). Some development trends of pedestrian bridge building. *Zauralsky Scientific Bulletin*, 1(7), pp. 69–76 (in Russian).
8. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Karakhanyan A.B. (2015). Promising directions of design on the example of modern pedestrian bridges. *Innovative transport*, 3, pp. 73–79 (in Russian).
9. Ovchinnikov I.I., Karakhanyan A.B., Ovchinnikov I.G. (2016). *Primenenie bionicheskogo podkhoda pri sozdanii peshekhodnykh mostov iz vysokoprochnykh betonov. [Application of the bionic approach when creating pedestrian bridges from high-strength concrete.]* Kazan: Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, p. 92, p. 60.
10. 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.
11. Bonser R.H.C. (2006). Patented biologically-inspired technological innovations a twenty-year view. *Journal of Bionic Engineering*, 3, pp. 39–41.
12. Knippers J., Speck T. (2012). Design and construction principles in nature and architecture. *Bioinspir Biomim*, 7, pp. 1–10.
13. Sadri Mehdi and etc. (2014). Bionic Architecture, Forms and Constructions. *Research Journal of Recent Sciences*, 3(3), pp. 93–98.
14. Aldersey-Williams H. (2004). Towards biomimetic architecture. *Nat Mater*, 3(5), pp. 277–279.
15. 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.

16. Bhushan B. (2009). Biomimetics: lessons from nature – an overview. *Philos. Trans Roy Soc. A Math Phys. Eng. Sci.*, 367(1893), pp. 1445–1486.
17. Ario I., Nakazawa M., Tanaka Y., Tanikura I., Ono S. (2013). Development of a prototype deployable bridge based on origami skill. *Autom. Constr.*, 32, pp. 104–111.
18. Helms M., Vattam S.S., Goel A.K. (2009). Biologically inspired design: process and products. *Des. Stud.*, 30(5), pp. 606–622.
19. Liu K., Jiang L. (2011). Bio-inspired design of multiscale structures for function integration. *Nano Today*, 6(2), pp. 155–175.
20. Mak T.W., Shu L.H. (2008). Using descriptions of biological phenomena for idea generation. *Res Eng Des.*, 19(1), pp. 21–28.
21. 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.
22. Shu L.H., Ueda K., Chiu I., Cheong H. (2011). Biologically inspired design. *CIRP Ann Manuf. Technol.*, 60(2), pp. 673–693.
23. Trotta M.G. (2001). Bio-inspired design methodology. *Int. J. Inform Sci.*, 1(1), pp. 1–11.
24. Chen P-Y., McKittrick J., Meyers M. (2012). Biological materials: functional adaptations and bioinspired designs. *Prog. Mater. Sci.*, 57, pp. 1492–1704.
25. Aldersey-Williams H. (2004). Towards biomimetic architecture. *Nature materials*, 3, pp. 277–279.
26. Knippers J., Speck T. (2012). Design and construction principles in nature and architecture. *Bioinspired Biomim*, 7, pp. 1–10.
27. Maglic, Michael J. (2014). Biomimicry: Using Nature as a Model for Design. *Masters Theses 1896*, p. 871.
28. Vincent J.F.V. (2001). *Stealing ideas from nature, in Deployable Structure*. Ed. by S. Pellegrino. Vienna, Austria.
29. 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.
30. Temnov V.G. (1987). *Konstruktivnye sistemy v prirode i stroitel'noy tekhnike. [Constructive systems in nature and construction equipment.]* Leningrad: Stroyizdat, p. 256.
31. Ovchinnikov I.G., Inamov R.R., Bakhtin S.A., Ovchinnikov I.I. (2002). Visyachie i vantovye mosty: ehsteticheskie problemy. [*Suspension and cable-stayed bridges: aesthetic problems.*] Saratov: Saratov State Technical University, p. 107.
32. Temnov V.G. (2010). Prinyatie konstruktivnykh resheniy pri proektirovanii iskusstvennoy sredy obitaniya. [*Making design decisions in the design of artificial habitats.*] Saint Petersburg: Nevsky Institute of Management and Design, pp. 183–191.
33. Gorbacheva I.A., Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G. (2017). Analysis of applicability of bridge aesthetics postulates to the problem of bridge designing. *Russian journal of transport engineering*, [online] 4(4), pp. 1–27. Available at: <https://t-s.today/PDF/12TS417.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/12TS417.
34. Ovchinnikov I.I., Gorbacheva I.A., Ovchinnikov I.G. (2019). The influence of innovation on the aesthetics of bridges. *Russian journal of transport engineering*, [online] 1(6). Available at: <https://t-s.today/PDF/01SATS119.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/01SATS119.