



Симбиоз аддитивных технологий, бионики и фрактального подхода в мостостроении

И. Г. Овчинников¹ ✉, И. О. Разов¹, Н. Б. Кудайбергенов²

¹ Тюменский индустриальный университет, ул. Володарского, 38, Тюмень, 625000, Российская Федерация

² Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, ул. Сатпаева, 2, Астана, 010008, Республика Казахстан

✉ bridgesar@mail.ru

Аннотация. Применение эффективных конструкций, технологий и материалов является одним из требований, предъявляемых к современным мостовым сооружениям. Традиционные технологии ориентированы на создание конструкций достаточно простых форм, в то время как современные решения позволяют расширить класс получаемых конструкций и спектр архитектурных форм. В настоящем исследовании на примере реальных объектов рассматривается положительный опыт применения в мостостроении таких современных технологий, как 3D-печать, бионический и фрактальный подходы. Анализируется возможность использования симбиоза данных технологий для создания современных мостовых сооружений, что представляется наиболее эффективным.

Ключевые слова: аддитивные технологии, бионика, фракталы, мостостроение, эффективные конструкции, фрактальные структуры, компьютерный инжиниринг

Благодарности. Статья подготовлена в рамках реализации государственного задания в сфере науки на выполнение научных проектов, реализуемых коллективами научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Минобрнауки России по проекту «Новые материалы и технологии возведения зданий, сооружений и их элементов с применением роботизированных аддитивных систем» (№ FEWN-2003-0004).

Для цитирования: Овчинников И. Г., Разов И. О., Кудайбергенов Н. Б. Симбиоз аддитивных технологий, бионики и фрактального подхода в мостостроении. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2024;(4):98–106. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-4-98-106>

Synergy of additive technologies, bionics and fractal approach in bridge engineering

Igor G. Ovchinnikov¹ ✉, Igor O. Razov¹, Nurlan B. Kudaibergenov²

¹ Industrial University of Tyumen, 38 Volodarskogo St., Tyumen, 625000, Russian Federation

² L. N. Gumilev Eurasian National University, 2 Satpayeva St., Astana, 010008, Republic of Kazakhstan

✉ bridgesar@mail.ru

Abstract. Modern bridge construction demands efficient designs, technologies, and materials. Traditional methods tend towards simpler designs, whereas modern approaches enable a wider variety of structures and

architectural forms. This research explores successful examples of 3D printing, bionics and fractal approaches in bridge engineering, and analyzes the potential of combining these technologies for optimal results in modern bridge construction.

Keywords: additive technologies, bionics, fractals, bridge construction, efficient structures, fractal structures, computer engineering

Acknowledgements. The work was prepared as part of the state assignment for the implementation of scientific projects by teams of laboratories of higher education institutions under the Ministry of Science and Higher Education of Russia; project No. FEWN-2003-0004 "New materials and technologies for the construction of buildings, structures and their elements using robotic additive systems".

For citation: Ovchinnikov I. G., Razov I. O., Kudaibergenov N. B. Synergy of additive technologies, bionics and fractal approach in bridge engineering. *Architecture, Construction, Transport*. 2024;(4):98–106. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-4-98-106>

1. Введение

По сравнению с традиционными методами строительства современные технологии обладают рядом преимуществ, которые позволяют оптимизировать строительный процесс и повысить качество конечного продукта. В настоящей статье рассматривается возможность симбиоза таких технологий, как 3D-печать, бионический и фрактальный подходы, для создания эффективных инженерных сооружений, в частности, мостов.

2. Результаты и обсуждение

Особенности применения аддитивных технологий в мостостроении. В мостостроении, в отличие от промышленного и гражданского строительства, аддитивные технологии применяются не так широко. Первым мостовым сооружением, созданным в 2016 г. с использованием аддитивных технологий, был пешеходный мост в Алькобендасе (Испания) (рис. 1). Конструкция моста длиной 12 м состояла из восьми сочлененных элементов. Мост был запроектирован так, чтобы хорошо вписываться в природу.

Еще один пешеходный мост с использованием аддитивных технологий был создан, по заверениям компании MX3D, в Амстердаме (Голландия). В лаборатории Joris LAARMAN Lab этой компанией был разработан 3D-принтер, который мог создавать достаточно сложные конструкции из различных металлов и сплавов посредством технологий электродуговой сварки и непрерывной подачи металлов. Таким образом, конструкция состояла из мелких расплавленных капель металла, т. е. создавался сплошной сварной шов (рис. 2).



Рис. 1. Пешеходный мост в Алькобендасе (Испания), напечатанный на 3D-принтере, 2016 г.¹
Fig. 1. 3D-printed pedestrian bridge in Alcobendas (Spain), 2016¹

¹ Первый 3D-печатный мост возведен в Испании. Режим доступа: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/the-first-3dprinted-bridge-was-built-in-spain> (дата обращения: 07.05.2024).



Рис. 2. Создание сварочной мостовой конструкции, Амстердам (Голландия)²
Fig. 2. Fabrication of a welded bridge structure, Amsterdam (Holland)²



Рис. 3. Испытания модели Крымского моста в аэродинамической трубе³
Fig. 3. Aerodynamic testing of a Crimean Bridge model in a wind tunnel³

При строительстве пешеходного моста через канал роботы, обладающие шестью степенями подвижности, двигались навстречу друг другу с противоположных берегов и пошагово печатали в воздухе сложную мостовую конструкцию пролетом 8 м (рис. 2). Хотелось бы отметить, что сварные узлы считаются самыми опасными с точки зрения возможных повреждений. В связи с этим возникает вопрос: как быть, если весь мост представляет собой сварной шов?

Аддитивные технологии в мостостроении применяются также для создания макетов объектов. Уменьшенные копии можно использовать для

проведения испытаний модели конструкции, чтобы получить информацию о поведении реального прототипа и оценить дизайн будущего объекта. Например, при создании Крымского моста проводились аэродинамические испытания с целью определения воздействия ветровых нагрузок на мост (рис. 3).

Следует заметить, что традиционные технологии ориентированы на создание конструкций достаточно простых форм, в то время как современные программные комплексы, основанные на нейросетях, способны работать с большими объемами данных, рассчитывать разные варианты и находить оптимальные с точки зрения расхода материала и формы конструкции, при этом данные формы могут быть весьма необычными.

Использование бионического подхода в мостостроении. Несмотря на наличие как в России, так и за рубежом ряда публикаций, посвященных применению бионического подхода [1–18], эта тема все еще недостаточно разработана, и результаты применения данного подхода не всегда эффективны. Бионический подход к созданию объектов называется биомиметикой или биомимикрией. Под биомиметикой понимается создание объектов, основные части которых «заимствуются» из природы [19], биомимикрия [20] подразумевает использование принципов устойчивого развития (Sustainable Design [21]), обеспечивающих сохранение природных ресурсов и минимизирующих отрицательное воздействие процессов создания и эксплуатации объектов на окружающую среду. В [20] сформули-

² В Голландии 3D-принтеры построят мост. Режим доступа: http://www.dp.ru/a/2015/06/18/V_Gollandii_3D-printeri_p/gallery/24406/182269/ (дата обращения: 12.06.2024).

³ Исследования Крымского моста в ландшафтной аэродинамической трубе. Режим доступа: http://krylov-centre.ru/press/video/1270/?sphrase_id=39665 (дата обращения: 14.06.2024).

рованы следующие принципы биомимикрии: форма объекта определяется его функциями; используется только та энергия, которая необходима; основой всего является многообразие; перерабатывается все, что возможно; взаимодействие поощряется; максимально используются ограниченные возможности; все создаваемое природой ориентируется на условия конкретной местности.

Следуя [22], можно отметить два алгоритма заимствования из живой природы при создании новых объектов: снизу вверх и сверху вниз (таблица 1).

На основе биомимикрии был запроектирован и реализован ряд мостовых сооружений в разных странах мира. Например, бионический подход применялся при создании в Сингапуре моста Волны Хендерсона [5] (рис. 4а) и моста Хеликс, напоминающего своей спиралевидной формой молекулу ДНК (рис. 4б). К сожалению, проектирование и строительство мостов такой сложности является непростой и дорогостоящей задачей.

Архитекторы пешеходной развязки в китайском городе Шэньчжэне, расположенной над транспортной магистралью, за основу взяли форму цветка (рис. 4с). Данный пешеходный мост считается одним самых красивых современных строений, но проект его также оказался неэффективным.

Конструкция моста Мира через реку Боу в канадском городе Калгари (рис. 4д) напоминает своим видом дождевого червя. Это проект знаменитого испанского архитектора Сантьяго Калатравы, автора ряда необычных сооружений, построенных в разных городах мира. Известно, что ни один проект Калатравы не уложился в смету и не был закончен вовремя.

Бионический подход к проектированию может быть реализован на макро- и на микроуровне. В первом случае при проектировании мостовых сооружений в целом или отдельных элементов (фундаментов, опор, пролетных строений и т. д.) используется внешний вид природных объектов, то есть применяется информация о форме биологических объектов (растений, животных, насекомых, рыб, микробов, человека), текстур поверхностей, характеристик механических структур, свойств биологических материалов и т. п. Примером применения бионического подхода на макроуровне может послужить вышеупомянутый мост Мира в Калгари или мост Питон в Амстердаме (рис. 4е).

Бионический подход на микроуровне подразумевает использование для конструирования или оптимизации мостов информации о внутренней структуре и особенностях функционирования живых созданий, иными словами, о внутреннем строении биологических организмов, процессах преобразования энергии в организмах, включая механизм нейронных реакций, передачу и обработку информации, возможность регулирования поведения, а также способность адаптироваться в окружающей среде. В качестве примера можно назвать спиралевидный мост Хеликс.

Таблица 1. Алгоритмы заимствований из живой природы для решения инженерных задач
Table 1. Bio-inspired algorithms for solving engineering problems

Снизу вверх		Сверху вниз	
Исходные данные	Фундаментальные биологические исследования	Исходные данные	Инженерная проблема
Исследования	Анализ биологических аналогов	Поиск аналогов	Нахождение биологических аналогов
Формулирование биологических принципов	Нахождение биологических принципов в биологических аналогах	Подбор биологических принципов для инженерной реализации	Анализ и систематизация подобранных биологических принципов
Обобщение	Преобразование биологических принципов в форму, пригодную для решения инженерной проблемы	Преобразование	Преобразование биологических принципов в форму, пригодную для решения инженерной проблемы
Решение инженерной проблемы	Применение биологических принципов для решения инженерной проблемы	Решение инженерной проблемы	Применение биологических принципов для решения инженерной проблемы

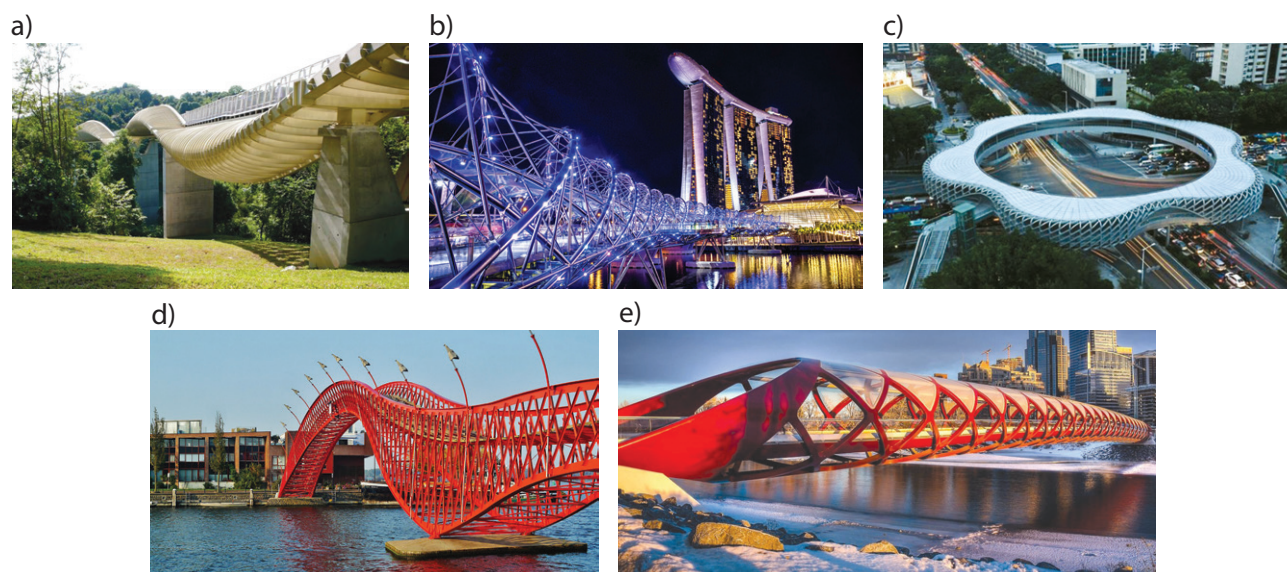


Рис. 4. Примеры применения бионического подхода в мостостроении за рубежом⁴
Fig. 4. Overseas applications of bionics approach in bridge building⁴

Использование фрактального подхода при проектировании сооружений. Перед проектировщиками инженерных сооружений обычно стоит задача создания конструкции, оптимальной с точки зрения соответствия ряду критериев, нередко конфликтующих. Это форма, размеры, вес, прочность, жесткость, устойчивость, грузоподъемность, долговечность, стоимость изготовления, монтажа и эксплуатации. Сроки проектирования также имеют значение, так как напрямую влияют на стоимость объекта. Опираясь лишь на свой опыт и интуицию, конструктор не в состоянии предложить оптимальное с точки зрения всех этих критериев решение.

Однако такую сложную задачу можно решить с помощью компьютерных методов многопараметрической, топологической, междисциплинарной оптимизации. Цель решения задачи оптимизации конструкции заключается в нахождении оптимального распределения материала в пространстве, которое занимает конструкция, с учетом внешних воздействий и условий опирания, а также сопряжения с другими элементами конструкции. При этом найденное решение должно удовлетворять требованиям прочности, жесткости, устойчивости, долговечности и наименьшего веса. Согласно [23], есть три типа топологической оптимизации:

- оптимизация размеров, реализуемая за счет варьирования толщины стенок элементов, толщины слоев, площади поперечного сечения и т. д. (рис. 5a),
- оптимизация формы, осуществляемая посредством изменения внутренних и внешних границ, контуров многосвязных тел, отверстий и др. (рис. 5b),
- оптимизация топографии, которая применима к двумерным объектам, толщина которых на порядок меньше характерных поперечных размеров (пластины, оболочки, проще говоря, произвольные поверхности), и обычно сводится к местным утолщениям несущей поверхности (рис. 5c).

В настоящее время компьютерные технологии оптимизации, как правило, используются не только в процессе проектирования, но и на этапе разработки концепции проекта. Это позволяет избежать полуинтуитивных методик, основанных на модернизации уже существующих конструктивных решений. При этом начинает достаточно широко применяться парадигма «моделирование и оп-

⁴ Фото из открытых источников.

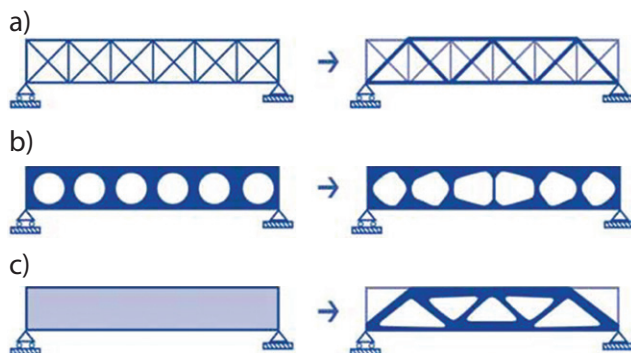


Рис. 5. Три типа топологической оптимизации [23]
Fig. 5. Three types of topological optimization [23]

тимизация» [24, 25], позволяющая посредством наукоемкого компьютерного моделирования и оптимизации достаточно быстро создавать объекты нового поколения повышенного качества. Трудность заключается в том, что конструкции, созданные с помощью современных компьютерных технологий по вышеуказанной парадигме, имеют сложную геометрическую форму, которую сложно изготовить. Эту непростую инженерную задачу можно было бы решить посредством сочетания компьютерных технологий [26] с эффективными аддитивными технологиями и с учетом бионического подхода.

В мостовых конструкциях широко используются балки в качестве элементов пролетных строений и колонны в виде опор. Причем балки пролетных строений нередко выполняются из стали или алюминиевых сплавов, имеющих высокие прочностные показатели. Но при проектировании этих конструкций необходимо выполнять расчет на действующие нагрузки.

Исследователь Йонг Мао с сотрудниками Университета Ноттингема предложил использовать для создания балочных конструкций фрактальные структуры, выполняемые по технологии 3D-печати [27]. Авторы полагают, что балочные конструкции, изготовленные с помощью аддитивных технологий (рис. 8), имеют очень высокую прочность при относительно малом весе. Разработчики утверждают, что при достаточно высокой жесткости прочность таких балок в тысячи раз превышает прочность балок, созданных по обычной технологии. Причем жесткость изготавливаемых конструкций можно настраивать под вид прикладываемой нагрузки. При этом отходы производства и затраты на их изготовление сокращаются. Следует заметить, что процесс создания фрактальных структур, из которых состоит балочная конструкция, весьма сложен.

Имитируя природные механизмы формирования фрактальных структур, специалистам удалось разработать целый ряд теоретических основ, которые можно использовать в том числе и для создания строительных конструкций. Речь идет о конструкциях, иерархический порядок в структуре которых находится в прямой зависимости от вида и степени воздействий и нагрузки на них.

Таким образом, симбиоз компьютерных технологий и аддитивного производства позволяет создавать структуры, способные подстраиваться под действующую нагрузку. К сожалению, на прочность этих фрактальных структур большое влияние оказывают возникающие в процессе изготовления дефекты, поэтому повышение живучести, то есть сопротивляемости конструкций к таким дефектам, является важной задачей.

3. Заключение

Проведенный анализ позволяет предположить, что симбиоз аддитивных технологий, бионики и фрактального подхода в мостостроении может оказаться эффективным. К сожалению, он пока развивается в зарубежных научных и инженерных организациях, но есть определенная надежда, что скоро и в России появятся подобные разработки.

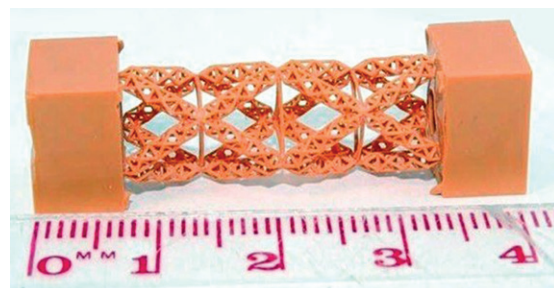


Рис. 8. Образец балочной конструкции, созданной с использованием фрактальных структур [27]
Fig. 8. A beam structure specimen created using fractal structures [27]



Вклад авторов. И. Г. Овчинников – общее руководство авторским коллективом, работа с текстом рукописи. И. О. Разов, Н. Б. Кудайбергенов – работа с текстом рукописи.

Author contributions. Igor G. Ovchinnikov: overall team leadership, and worked on the manuscript. Igor O. Razov, and Nurlan B. Kudaibergenov: worked on the manuscript.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no relevant conflict of interest.

Список литературы

1. Темнов В. Г. *Конструктивные системы в природе и строительной технике*. Ленинград: Стройиздат; 1987. 256 с. Режим доступа: <https://m.eruditor.one/file/1323456/>.
2. Ковырягин М. А., Овчинников И. Г. *Управляемые конструкции (в мостостроении)*. Саратов: Саратовский государственный технический университет; 2003. 95 с.
3. Овчинников И. Г., Караханян А. Б. Применение бионического подхода к проектированию пешеходных мостов. В сб.: *Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: Международная научно-практическая конференция, Пермь, 23-24 апреля 2015 г.* Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет; 2015. С. 430–436. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23646394>.
4. Овчинников И. Г., Овчинников И. И., Караханян А. Б. *Пешеходные мосты современности: тенденции проектирования. Часть 1. Использование бионического подхода*. Наукоедение. 2015;7(2):81TVN215. Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/81TVN215.pdf>.
5. Овчинников И. И., Караханян А. Б., Овчинников И. Г., Скачков Ю. П. *Современные пешеходные и велосипедные мосты (основные концепции проектирования и примеры)*. Пенза: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства; 2018. 140 с.
6. Aldersey-Williams H. Towards biomimetic architecture. *Nature Materials*. 2004;3:277–279. <https://doi.org/10.1038/nmat1119>
7. Bonser R.H.C. Patented Biologically-inspired technological innovations: A twenty year view. *Journal of Bionic Engineering*. 2006;3(1):39–41. [https://doi.org/10.1016/S1672-6529\(06\)60005-X](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(06)60005-X)
8. 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(9):471–482. <https://doi.org/10.1098/rsif.2006.0127>
9. Mak T. W., Shu L. H. Using descriptions of biological phenomena for idea generation. *Research in Engineering Design*. 2008;19:21–28. <https://doi.org/10.1007/s00163-007-0041-y>
10. Bhushan B. Biomimetics: lessons from nature-an overview. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2009;367(1893):1445–1486. <https://doi.org/10.1098/rsta.2009.0011>
11. Helms M., Vattam S. S., Goel A. K. Biologically inspired design: process and products. *Design Studies*. 2009;30(5):606–622. <https://doi.org/10.1016/J.DESTUD.2009.04.003>
12. Liu K, Jiang L. Bio-inspired design of multiscale structures for function integration. *Nano Today*. 2011;6(2):155–175. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2011.02.002>
13. Santulli C., Langella C. Introducing students to bio-inspiration and biomimetic design: a workshop experience. *International Journal of Technology and Design Education*. 2011;21:471–485. <https://doi.org/10.1007/s10798-010-9132-6>
14. Shu L. H., Ueda K., Chiu I., Cheong H. Biologically inspired design. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2011;60(2):673–693. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.06.001>
15. Chen P.-Y., McKittrick J., Meyers M. A. Biological materials: Functional adaptations and bioinspired designs. *Progress in Materials Science*. 2012;57(8):1492–1704. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2012.03.00>
16. Knippers J., Speck T. Design and construction principles in nature and architecture. *Bioinspiration & Biomimetics*. 2012;7(1):015002. <https://doi.org/10.1088/1748-3182/7/1/015002>
17. Bar-Cohen Y. Nature as a model for mimicking and inspiration of new technologies. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*. 2012;13(1):1–13.
18. Maglic Michael J. Biomimicry: Using Nature as a Model for Design. *Masters Theses*. 2012. P. 871. <https://doi.org/10.7275/2820720>
19. Murugan R., Wang X., Chen G., Guoping Ch., Peter M., Fu-Zhai C. (eds.) *Biomimetics: Advancing nanobiomaterials and tissue engineering*. Salem: Scrivener Publishing; 2013. 384 p. Available at: <http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/4133/1/21.pdf>.
20. Benyus J. *Biomimicry: Innovation inspired by nature*. New York: William Morrow & Co.; 1997. 308 p. <https://doi.org/10.1002/inst.12116>

21. Ovchinnikov I. G., Ovchinnikov I. I. Sustainable bridge design in Russia. In: *Railway Transport and Technologies (RTT-2021)*, Ekaterinburg, November 24–25 2021. USA: Aip Publishing; 2023. P. 030021. <https://doi.org/10.1063/5.0133764>
22. Freitas Salgueiredo C. Modeling biological inspiration for innovative design. *i3 Conference 2013, October 15 2013*. P. 1–17. Available at: https://i3.cnrs.fr/wp-content/uploads/2016/05/Freitas__conference132013.pdf.
23. Olason A., Tidman D. *Methodology for topology and shape optimisation in the design process. Master's Thesis in the Master's programme Solid and Fluid Mechanics*. Goteborg: Chalmers University of Technology; 2011. Available at: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/130136.pdf>.
24. Мальцева Т. В., Трефилина Е. Р. Моделирование двухфазного тела с учетом несущей способности жидкой фазы. *Математическое моделирование*. 2004;16(11):845–852. Режим доступа: https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=mm&paperid=222&option_lang=rus.
25. Боровков А. И., Бурдаков С. Ф., Клявин О. И., Мельникова М. П., Михайлова А. А., Немов А. С. и др. *Компьютерный инжиниринг*. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; 2012. 93 с.
26. Melnikov R., Zazulya Ju., Stepanov M., Ashikhmin O., Maltseva T. OCR and POP parameters in Plaxis-based numerical analysis of loaded over consolidated soils. *Procedia Engineering*. 2016;165:845–852. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.783>
27. Rayneau-Kirkhope D, Maoa Y., Farr R., Segal J. Hierarchical space frames for high mechanical efficiency: Fabrication and mechanical testing. *Mechanics Research Communications*. 2012;46:41–46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechrescom.2012.06.011>

References

1. Temnov V. G. *Structural systems in nature and construction technology*. Leningrad: Stroyizdat; 1987. (In Russ.) Available at: <https://m.eruditor.one/file/1323456/>.
2. Kovryagin M. A., Ovchinnikov I. G. *Controlled structures (in bridge construction)*. Saratov: Saratov State Technical University; 2003. (In Russ.)
3. Ovchinnikov I. G., Karakhanyan A. B. Applying a bionic approach to the design of pedestrian bridges. In: *Modernization and Scientific Research in the Transport Complex: International Scientific and Practical Conference, Perm, April 23-24, 2015*. Perm: Perm National Research Polytechnic University; 2015. P. 430–436. (In Russ.) Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23646394>.
4. Ovchinnikov I. G., Ovchinnikov I. I., Karakhanyan A. B. Pedestrian Bridges: modern trends design. Part 1. Using the bionic approach. *Naukovedenie*. 2015;7(2):81TVN215. (In Russ.) Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/81TVN215.pdf>.
5. Ovchinnikov I. I., Karakhanyan A. B., Ovchinnikov I. G., Skachkov Yu. P. *Modern pedestrian and bicycle bridges (basic design concepts and examples)*. Penza: Penza State University of Architecture and Construction; 2018. (In Russ.)
6. Aldersey-Williams H. Towards biomimetic architecture. *Nature Materials*. 2004;3:277–279. <https://doi.org/10.1038/nmat1119>
7. Bonser R. H. C. Patented Biologically-inspired technological innovations: A twenty year view. *Journal of Bionic Engineering*. 2006;3(1):39–41. [https://doi.org/10.1016/S1672-6529\(06\)60005-X](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(06)60005-X)
8. 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(9):471–482. <https://doi.org/10.1098/rsif.2006.0127>
9. Mak T.W., Shu L.H. Using descriptions of biological phenomena for idea generation. *Research in Engineering Design*. 2008;19:21–28. <https://doi.org/10.1007/s00163-007-0041-y>
10. Bhushan B. Biomimetics: lessons from nature-an overview. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2009;367(1893):1445–1486. <https://doi.org/10.1098/rsta.2009.0011>
11. Helms M., Vattam S. S., Goel A. K. Biologically inspired design: process and products. *Design Studies*. 2009;30(5):606–622. <https://doi.org/10.1016/J.DESTUD.2009.04.003>
12. Liu K, Jiang L. Bio-inspired design of multiscale structures for function integration. *Nano Today*. 2011;6(2):155–175. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2011.02.002>
13. Santulli C., Langella C. Introducing students to bio-inspiration and biomimetic design: a workshop experience. *International Journal of Technology and Design Education*. 2011;21:471–485. <https://doi.org/10.1007/s10798-010-9132-6>
14. Shu L. H., Ueda K., Chiu I., Cheong H. Biologically inspired design. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2011;60(2):673–693. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.06.001>
15. Chen P.-Y., McKittrick J., Meyers M. A. Biological materials: Functional adaptations and bioinspired designs. *Progress in Materials Science*. 2012;57(8):1492–1704. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2012.03.00>

16. Knippers J., Speck T. Design and construction principles in nature and architecture. *Bioinspiration & Biomimetics*. 2012;7(1):015002. <https://doi.org/10.1088/1748-3182/7/1/015002>
17. Bar-Cohen Y. Nature as a model for mimicking and inspiration of new technologies. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*. 2012;13(1):1–13. <https://doi.org/10.5139/IJASS.2012.13.1.1>
18. Maglic Michael J. *Biomimicry: Using Nature as a Model for Design*. Masters Theses. 2012. P. 871. <https://doi.org/10.7275/2820720>
19. Murugan R., Wang X., Chen G., Guoping Ch., Peter M., Fu-Zhai C. (eds.) *Biomimetics: Advancing nanobiomaterials and tissue engineering*. Salem: Scrivener Publishing; 2013. Available at: <http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/4133/1/21.pdf>.
20. Benyus J. *Biomimicry: Innovation inspired by nature*. New York: William Morrow & Co.; 1997. <https://doi.org/10.1002/inst.12116>
21. Ovchinnikov I. G., Ovchinnikov I. I. Sustainable bridge design in Russia. In: *Railway Transport and Technologies (RTT-2021)*, Ekaterinburg, November 24–25 2021. USA: Aip Publishing; 2023. P. 030021. <https://doi.org/10.1063/5.0133764>
22. Freitas Salgueiredo C. Modeling biological inspiration for innovative design. *i3 Conference 2013, October 15 2013*. P. 1–17. Available at: https://i3.cnrs.fr/wp-content/uploads/2016/05/Freitas__conference132013.pdf.
23. Olason A., Tidman, D. *Methodology for topology and shape optimisation in the design process*. Masters Thesis in the Master's programme Solid and Fluid Mechanics. Goteborg: Chalmers University of Technology; 2011. Available at: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/130136.pdf>.
24. Maltseva T. V., Trefilina E. R. Modeling of the two-phase body with account of carrying abilities of the fluid phase. *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2004;16(11):845–852. (In Russ.) Available at: https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=mm&paperid=222&option_lang=rus.
25. Borovkov A. I., Burdakov S. F., Klyavin O. I., Melnikova M. P., Mikhailova A. A., Nemov A. S. et al. *Computer Engineering*. St. Petersburg: St. Petersburg and Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; 2012. (In Russ.)
26. Melnikov R., Zazulya Ju., Stepanov M., Ashikhmin O., Maltseva T. OCR and POP parameters in Plaxis-based numerical analysis of loaded over consolidated soils. *Procedia Engineering*. 2016;165:845–852. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.783>
27. Rayneau-Kirkhope D, Maoa Y., Farr R., Segal J. Hierarchical space frames for high mechanical efficiency: Fabrication and mechanical testing. *Mechanics Research Communications*. 2012;46:41–46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechrescom.2012.06.011>



Информация об авторах

Овчинников Игорь Георгиевич, д-р техн. наук, профессор, профессор базовой кафедры АО «Мостострой-11», Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, bridgesar@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0617-3132>

Разов Игорь Олегович, канд. техн. наук, доцент, доцент базовой кафедры АО «Мостострой-11», Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-4829-7080>

Кудайбергенов Нурлан Баязитович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры строительства, Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, Астана, Республика Казахстан, Knб_1955@mail.ru

Information about the authors

Igor G. Ovchinnikov, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Professor in the Basic Department of JSC "Mostostroy-11", Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, bridgesar@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0617-3132>

Igor O. Razov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor in the Basic Department of JSC "Mostostroy-11", Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-4829-7080>

Nurlan B. Kudaibergenov, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Professor in the Department of Construction, L. N. Gumilev Eurasian National University, Astana, Republic of Kazakhstan, knб_1955@mail.ru

Получена 15 сентября 2024 г., одобрена 17 ноября 2024 г., принята к публикации 03 декабря 2024 г.
Received 15 September 2024, Approved 17 November 2024, Accepted for publication 03 December 2024