 © Авторы статьи / Authors of the article

АРХИТЕКТУРА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ТВОРЧЕСКИЕ КОНЦЕПЦИИ АРХИТЕКТУРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ/ARCHITECTURE OF BUILDINGS AND STRUCTURES. CREATIVE CONCEPTS OF ARCHITECTURAL ACTIVITY

DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.6 EDN: IJBSBO

ЧЕТЫРЕХМЕРНАЯ АРХИТЕКТУРА: ОСОБЕННОСТИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

Научная статья

Храмова М.А.[1, *], Храмов И.В.[2]
[1] ORCID : 0009-0008-4321-8030;
[2] ORCID : 0009-0000-7539-652X;
[1, 2] Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (m.khramova[at]mail.ru)

Предложена: 18.10.2026; Принята: 02.11.2026; Опубликована: 20.11.2026

Аннотация

В статье представлена инновационная концепция генерации адаптивных архитектурных объектов с бинарной природой формообразования, разработанная на базе метода трансметрического монопараметризма (ТММ) — авторского термина. В рамках концепции рассматривается совместная работа внешних адаптивных экзокаркасов, формирующих иррациональный внешний контур здания и воспринимающих основные динамические средовые нагрузки, и классических жёстких дисков этажей, перераспределяющих полезную нагрузку и транслирующих её на узлы экзокаркаса (рис. 1). Уникальность структуры экзокаркаса обусловлена глубокой интеграцией в неё адаптивной системы управления преднапряжением, позволяющей в режиме реального времени формировать ответ на внешние вызовы, связанные с климатическими изменениями, участившимися ураганами, сейсмической активностью и техногенными нагрузками. При этом иррациональная структура экзокаркаса визуально транслирует уникальный дизайн-код такого объекта. Целью настоящего исследования является раскрытие биоморфного потенциала метода ТММ, комплексный анализ пластических ограничений, возникающих при генерации подобных пространственных макроструктур, а также выработка проектных стратегий их преодоления. Язык изложения сохраняет профессиональную архитектурную направленность, избегая излишней математической формализации.

Ключевые слова: трансметрический монопараметризм, монопараметрическое пространство, адаптивные несущие системы, экзокаркасы, пространственные стержневые конструкции, тетраэдрические модули, предварительное напряжение, бинарное формообразование.

FOUR-DIMENSIONAL ARCHITECTURE: SPECIFICS OF SHAPE FORMATION

Research article

Khramova M.A.[1, *], Khramov I.V.[2]
[1] ORCID : 0009-0008-4321-8030;
[2] ORCID : 0009-0000-7539-652X;
[1, 2] Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg, Russian Federation

* Corresponding author (m.khramova[at]mail.ru)

Suggested: 18.10.2026; Accepted: 02.11.2026; Published: 20.11.2026

Abstract

The article presents an innovative concept for the generation of adaptive architectural objects with a binary nature of form-generation, developed on the basis of the method of transmetric monoparametrism (TMM) — a term coined by the author. Within the framework of this concept, the paper examines the interaction between external adaptive exoskeletons, which form the building's irrational external contour and absorb the main dynamic environmental loads, and classical rigid floor slabs, which redistribute the live load and transmit it to the exoskeleton's nodes (Fig. 1). The uniqueness of the exoskeleton's structure is due to the deep integration of an adaptive prestressing control system, which makes it possible to generate a real-time response to external challenges associated with climate change, more frequent hurricanes, seismic activity and technogenic loads. At the same time, the irrational structure of the exoskeleton visually conveys the unique design language of such a structure. The aim of this study is to uncover the biomorphic potential of the TMM method, to conduct a comprehensive analysis of the plastic constraints arising during the generation of such spatial macrostructures, and to develop design strategies to overcome them. The language used maintains a professional architectural focus, while avoiding excessive mathematical formalisation.

Keywords: transmetric monoparametricism, monoparametric space, adaptive load-bearing systems, exoskeletons, spatial bar structures, tetrahedral modules, prestressing, binary form-making.

Введение

Традиционный подход к проектированию большепролётных и высотных зданий предполагает восприятие пиковых нагрузок за счёт увеличения сечений элементов, применения высокопрочных материалов и введения пассивных

 © Авторы статьи / Authors of the article

демпферов [14]. Этот подход, хотя и надёжен, приводит к росту материалоёмкости, удорожанию строительства и усложнению архитектурной тектоники сооружений.

Альтернативой является создание адаптивных конструкций, способных изменять свои жёсткостные и диссипативные характеристики в ответ на внешние воздействия. В мировой практике известны системы активного демпфирования с использованием гидравлических приводов, магнитореологических жидкостей и пьезоэлектрических актуаторов [14]. Однако большинство из них представляют собой внешние дополнительные системы, решающие локальные задачи [5].

Предлагаемое решение основано на глубокой интеграции исполнительных адаптивных систем непосредственно в геометрическую структуру базового модуля — равностороннего тетраэдра [6]. Это позволяет «сбалансированно» переводить внешние рёбра каркаса в режим контролируемого упругого растяжения, что, в свою очередь, даёт комплексное управление базовыми свойствами объекта в режиме реального времени. Процесс оптимизирует несущую способность, регулирует жёсткость и изменяет собственную частоту конструкции для предотвращения резонансных явлений при динамических и техногенных воздействиях.

В статье рассматривается ключевая проблема, связанная с объективными визуальными и пластическими ограничениями формообразования, и предлагаются способы их преодоления при проектировании архитектурных объёмов рассматриваемым методом.

Методы и принципы исследования

2.1. Апробация и внедрение результатов исследования (Патентный статус)

Основное конструктивное решение защищено действующим патентом РФ на изобретение № 2867044 [6]. В патентных документах, относящихся к предмету поиска, указаны только наименования документов категории А (далёкие, фоновые аналоги, пять документов). Это говорит о достаточной уникальности решений. Произведено депонирование проектных решений на базовых мировых платформах.

Патент защищает конструктивное решение экзокаркаса, тогда как предлагаемый в настоящей статье метод ТММ является описанием бинарной природы архитектурного формообразования. Поскольку в любой архитектурной форме, созданной этим методом, присутствует экзокаркас, в каждом таком объекте содержится предмет патентного права.

Основы метода разрабатывались авторами начиная с 2019-2020 годов на базе и с привлечением коммерческих ресурсов ООО «Северный стиль»:

Генеральным директором и руководителем Архитектурной мастерской «Северный стиль», Санкт-Петербург, Россия, Храмовой Мариной Александровной и Главным архитекором Архитектурной мастерской «Северный стиль», Санкт-Петербург, Россия, Храмовым Игорем Владимировичем.

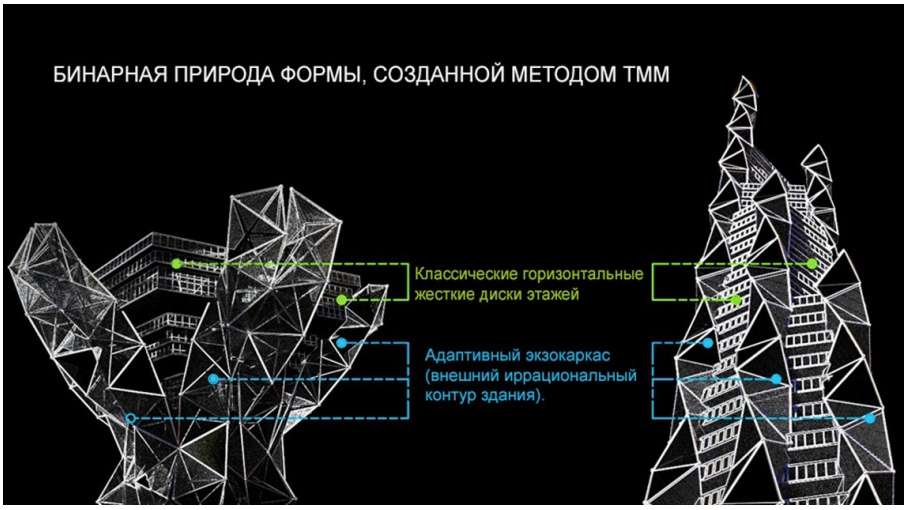


Рисунок 1 - Бинарная природа формообразования
DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.6.1

Примечание: графический материал разработан авторами

2.2. Методика, термины и определения. Метод ТММ (трансметрический монопараметризм)

Математический и конструктивный базис технологии опирается на разработанный авторами метод трансметрического монопараметризма (ТММ), объединяющий два принципа:

Трансметричность — перенос векторов деструктивных механических воздействий из привычного трёхмерного пространства (3D) в скалярное поле внутренних напряжений (4D): линейные изгибающие моменты преобразуются в объёмное сжатие жидкой среды.

Монопараметризм — построение экзокаркаса макроформы тесселяцией единственного модуля-инварианта (каркасной структуры, равностороннего тетраэдра) таким образом, что рёбра, образующие грань одного модуля, являются рёбрами, образующими грань соседнего модуля. При этом изменение характеристик всего одного параметра — барицентрического градиента давления активного вещества в центроиде модуля-инварианта экзокаркаса —

 © Авторы статьи / Authors of the article

порождает изменения свойств системы в целом, в последовательности и интенсивности, соразмерной её топологической структуре.

Термин «тесселяция» означает в данной статье заполнение плоскости или пространства ячейками без пробелов и перекрытий; в ТММ — сборка экзокаркаса из тетраэдрических модулей по общим рёбрам.

Термины «трансметрический монопараметризм» и «трансметричность» введены авторами настоящей статьи впервые и ранее в научной и технической литературе не встречались [8]. Отдельные аспекты топологического моделирования пространственных стержневых систем рассматривались в работах, однако предложенный метод ТММ впервые описывает бинарную природу формообразования через призму монопараметрического управления.

Для того чтобы понять суть метода генерации форм экзокаркасов, необходимо дать определение общего структурного поля плотной упаковки модулей. Назовем это поле монопараметрическим пространством.

Монопараметрическое пространство — это пространство с максимально плотным заполнением тетраэдрическими модулями, в котором лишь определённая часть структурных цепочек пригодна для формообразования экзокаркасов архитектурных объектов [3]. Остальные тесселяции ведут к топологическим тупикам, неконтролируемым пересечениям и, как следствие, разрушению формы, поэтому архитектор работает не со всем пространством, а с его допустимым подмножеством.

2.3. Обоснование четырёхмерности как удобной модели

Отличительной особенностью рассматриваемых экзокаркасов ТММ как стержневых структур от классических стержневых каркасов является присутствие четвертого параметра, глубоко интегрированного в схему работы этой структуры. Рассмотрим эту схему.

В классике поперечные и продольные силы стремятся вывести стержень из равновесия, что ведёт к увеличению сечений конструкции и её массы. В ТММ часть направленного воздействия преобразуется в области центроида модуля в давление среды — величину без направления. Центроид получает скалярную характеристику, однозначно описывающую напряжённое состояние ячейки [8].

Состояние модуля описывается вектором состояния: V = (x, y, z, P), где x, y, z — геометрические координаты центроида в трехмерном пространстве, а параметр P — скалярное значение внутреннего давления в рабочей камере. Три пространственные координаты плюс давление образуют четыре координаты формы, где четвёртая P — параметр состояния, задающий жёсткость и частоту [8]. Строго говоря, четвёртая координата в модели ТММ не является пространственной в математическом смысле — это параметр состояния, что, однако, допускает формальное отображение в четырёхмерное пространство (x, y, z, P).

Переход «направленное усилие → безнаправленное давление» авторы называют трансметрическим, а пространство, где он совершается, — четырёхмерным [8]. Данная схема позволяет управлять всеми защитными характеристиками всего лишь через один параметр — барицентрический градиент давления (в целевом диапазоне от 0,1 до 3,0 МПа). Кроме того, локация рабочей камеры модуля центроида геометрически совпадает с расположением пятой вершины четырехмерного симплекса (пентахора) и расположена равноудалённо от всех вершин [2].

Пентахор ({3,3,3}) — правильный четырёхмерный симплекс (политоп), имеющий 5 вершин, 10 рёбер и 5 тетраэдрических ячеек. Таким образом, четыре вершины модуля-тетраэдра, имеющие физическую величину в рассматриваемой схеме, дополняются пятой виртуальной вершиной симплекса, геометрически соответствующей расположению системы рабочей камеры модуля, находящейся в физическом трехмерном пространстве в области центроида и обеспечивающей функционирование скалярного параметра P. Несмотря на возможность редукции описанных физических процессов к трехмерному базису, введение четырехмерного вектора состояния является релевантной математической моделью. Данный подход оптимизирует расчетные алгоритмы и открывает перспективы для исследования скрытых динамических закономерностей при перераспределении усилий в адаптивных системах [8].

2.4. Проектные инструменты

Так как основные решения при проектировании форм экзокаркасов связаны с тесселяцией модулей под иррациональными углами и локализацией продуктов проектирования в иррациональном, трудночитаемом монопараметрическом пространстве, а существующие программные продукты общего профиля на сегодняшний день не способны обеспечивать быстрое формообразование подобных форм. Для решения этой проблемы нашей исследовательской группой на базе Grasshopper в среде Rhinoceros (Rhino) был создан ***авторский программный плагин на языке Python***, позволяющий быстро, в режиме реального времени визуализировать геометрическую топологию монопараметрического пространства и создавать достаточно сложные формы экзокаркасов.

Кроме того, на основе предварительно выполненных инженерных расчетов разработанный програмный модуль осуществляет автоматическое построение реальных конструктивных сечений каркасов вдоль базовых направляющих, позволяя визуализировать детальную конструктивную модель. Данный продукт высвобождает время архитекторов и позволяет перенести внимание на общую топологическую пластику и художественный образ.

Графические материалы представленных в статье авторских архитектурных форм прошли следующие этапы моделирования:

- геометрический инжиниринг формы в среде Rhino;
- генерация в среде Rhinoceros (Rhino) реальных конструктивных сечений каркасов вдоль базовых направляющих;
- интеграция в структуру каркаса сетки горизонтальных этажей в среде Rhinoceros (Rhino);
- конвертация и адаптация проектных результатов инжиниринга в сетку 3ds Max, текстурирование шейдинг и финальный рендеринг формы;
- нейросетевой постпроцессинг (ИИ-постобработка): оптимизация антуража и освещения в нейросетях до реалистической стадии (нейросети здесь использовались лишь как финальный инструмент постшлифовки готовой модели).

 © Авторы статьи / Authors of the article

2.5. Принцип формообразования адаптивных конструкций экзокаркасов

Тесселяция базового модуля в макроструктуру и образование экзокаркаса объекта происходит по принципу «стержни-рёбра одного модуля являются стержнями-рёбрами соседнего модуля». В строгом математическом смысле такая процедура представляет собой построение симплициального комплекса из тетраэдрических симплексов, подчинённое правилу: два соседних модуля имеют общую грань (ребро), а не произвольное пересечение [2]. Данная процедура не образует новых связей за пределами геометрии модуля, что позволяет максимально сохранять его свойства и транслировать их на макроструктуру. Таким образом, преднапряжение одного модуля образует топологически связное преднапряжение всей макроформы.

Принцип саморегулирования экзокаркасов ТММ не сводится к внешнему управлению и не требует централизованной обратной связи — он есть суть объединения трёх взаимосвязанных свойств структуры:

1. Параметр состояния P является скалярной величиной: он не имеет направления и потому не создаёт векторных конфликтов в узлах.

2. Медианы тетраэдрического модуля неколлинеарны, поэтому усилия от штоков гидросистемы компенсируются лишь частично, оставляя преднапряжённую результирующую.

3. Тесселяция по общим рёбрам обеспечивает распределенную передачу этой результирующей в центроиды соседних модулей.

В результате в центроидах происходит скалярное сложение парциальных давлений, приходящих от разных цепочек. Описанный механизм определяет характер работы экзокаркаса под воздействием динамических и пиковых нагрузок. В отличие от классических стержневых систем, где локальный импульс деструктивного воздействия вызывает критические векторные перегрузки в узлах, в структуре ТММ кинетическая энергия внешнего воздействия трансформируется в объемное сжатие рабочей среды в области центроида. Локальное изменение скалярного параметра P бесконфликтно суммируется с базовым давлением преднапряжения и диссипирует (рассеивается) вдоль топологической цепочки сопряженных модулей. Таким образом, адаптивный каркас не оказывает жесткого реактивного сопротивления удару, а упруго перераспределяет внутренние напряжения через скалярное поле давлений центроидов, демпфируя внешнее возмущение и сохраняя общую устойчивость макроформы.

Строгое доказательство устойчивости и сходимости этого процесса выходит за рамки настоящей статьи. Здесь мы ограничиваемся описанием механизма и указанием его топологического основания. Предметом дальнейшего исследования остаются проблемы пластических ограничений, возникающих при формообразовании методом ТММ.

На рис. 2 приведена схема пространственной стержневой замкнутой шарнирной конструкции экзокаркаса на примере цепочки из 4 модулей [6]. При создании давления в общей рабочей камере 2, штоки цилиндров 3 раздвигаются и вводят каркас модуля в преднапряжённое состояние, растягивая рёбра каркаса в области малой упругой деформации (в пределах значений $\varepsilon \leq 0{,}25\%$). Каркас модуля пытается вернуться в исходное положение, и модуль буквально «садится на демпферную подушку» [6], [14].

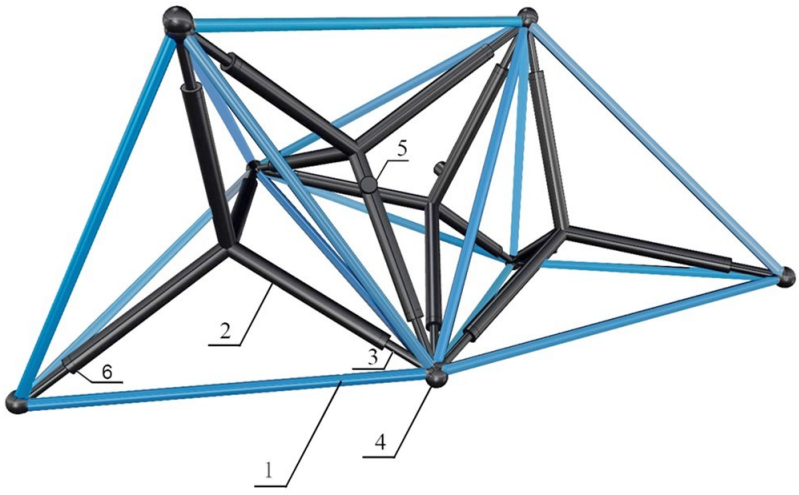


Рисунок 2 - Схема работы пространственной стержневой замкнутой шарнирной конструкции экзокаркаса на примере цепочки из 4 модулей

DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.6.2

Примечание: графический материал разработан авторами; расшифровка: 1 – стержни-рёбра тетраэдра; 2 – стержни-медианы (общая рабочая камера в виде четырёх полых ёмкостей); 3 – стержни-медианы (штоки гидросистемы; 4 – шарнир системы; 5 – управление давлением (нагнетатель давления)

 © Авторы статьи / Authors of the article

Основные результаты

3.1. Синтез геометрических структур и органических форм в формообразовании адаптивных конструкций

В результате первичной генерации обьектов в рамках геометрического инжиниринга экзокаркасов в среде Rhino, было установлено, что при объединении нескольких тетраэдров общими рёбрами возникает новая конфигурация, где каждое последующее звено изменяет ориентацию относительно предыдущего. Необходимость сохранения устойчивости конструкции приводит к образованию спиралевидных и закрученных форм, напоминающих природные структуры — от молекулярных решёток до двойной спирали ДНК (рис. 3) [10], [11].

Подобное формообразование раскрывает глубинную взаимосвязь между абстрактными геометрическими структурами и органическими формами, демонстрируя биоморфизм и геометризацию как его естественные свойства [1], [11]. На первый взгляд сочетание строгой геометрии (например, правильного тетраэдра) с биологическими прототипами кажется парадоксальным, однако именно в этом синтезе заключается уникальность метода [8], [11].

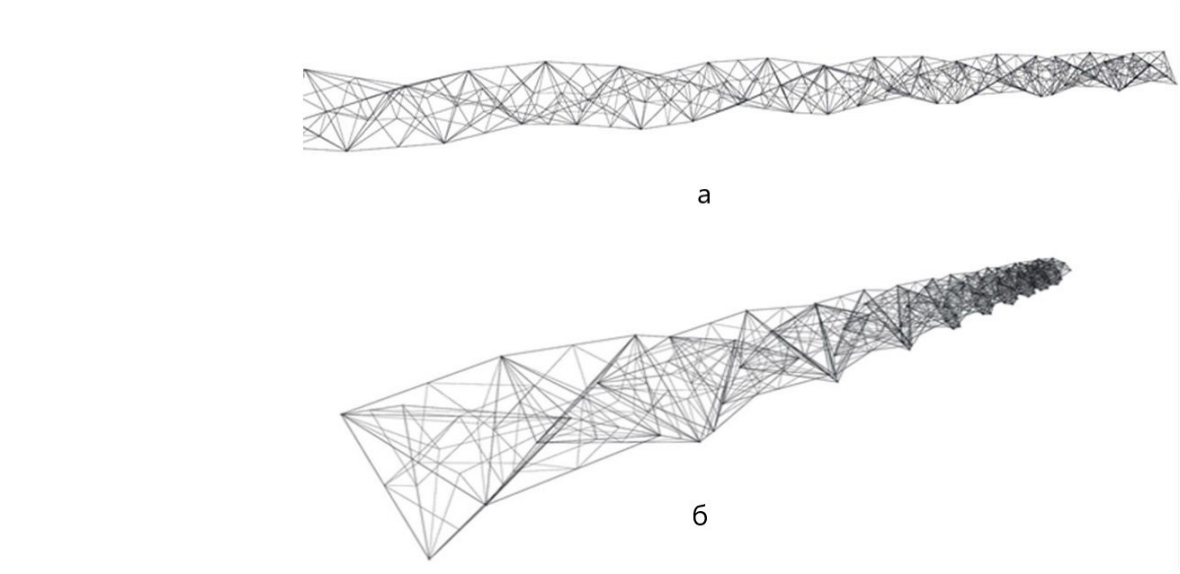


Рисунок 3 - Спиралевидные закрученные формы структуры, образованные методом ТММ:
а) вид сбоку, видна спиралевидная структура формы; *б)* перспективный вид, отчетливо видна иррациональная структура

DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.6.3

Примечание: графический материал разработан авторами

3.2. Биоморфизм как естественное свойство экзокаркасов ТММ

В архитектуре биоморфизм традиционно воспринимается как имитация природных форм [1]. Однако в рассматриваемом методе эта связь проявляется глубже — не как свободный художественный авторский образ, а как естественное следствие модульной организации [11].

Ключевая особенность тетраэдра — отсутствие параллельных граней — при тесселяции неизбежно порождает спиралевидные структуры [2], [3]. Это свойство снимает кажущееся противоречие между строгой геометрией и органической пластикой, доказывая, что сложные биоморфные конструкции могут возникать из элементарных геометрических принципов [11]. *Данное положение согласуется с современными исследованиями в области морфогенеза архитектурных форм* [12]. Визуально такие формы сочетают спиралевидную динамику с модульной дискретностью [10], создавая новый тип эстетики — монопараметрическую иррациональность, где хаотичная на первый взгляд структура подчинена внутренней логике геометрического алгоритма [9]. Эти структуры могут достаточно органично взаимодействовать с классическими формами.

Описанный механизм объясняет и поведение экзокаркаса под внешней нагрузкой. В классической стержневой системе удар по одному узлу создаёт векторную перегрузку в этом узле, требуя либо усиления, либо разрушения. В структуре ТММ внешнее воздействие приходит в центроид как изменение скалярного параметра P, складывается с уже имеющимся давлением и перераспределяется по цепочке. Каркас не сопротивляется удару жёстко — он «дышит», растворяя возмущение в скалярном поле центроидов.

3.2.1. Примеры генераций экзокаркасов

В результате поиска приемлемых форм экзокаркасов было установлено, что биоморфные свойства заложены в самой структуре, а архитектор выступает не как единственный творец, а как соавтор природы [11], [13]. Ограничения метода (например, жёсткость геометрических модулей) становятся его преимуществом [8]. Если автор сумеет гармонично вписать идею в структурные рамки, возникает смысловой резонанс, где форма, функция и конструкция сливаются в единое целое [12].

 © Авторы статьи / Authors of the article

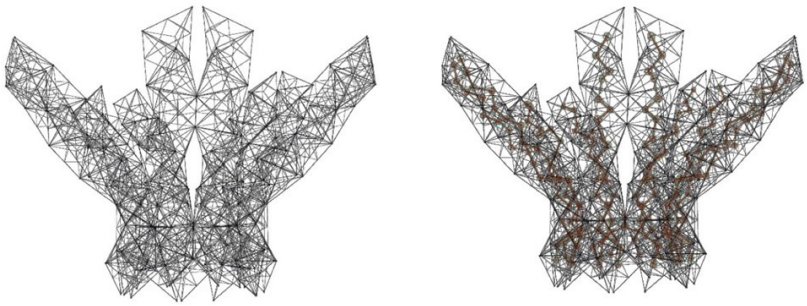
Рассматривая метод формообразования «Траснметрический монопараметризм», в качестве единых пластических решений бинарных форм были выделены два типа экзокаркасов:

1. Экзокаркас как собственная выразительная самодостаточная форма.
2. Экзокаркас как отдельные Элементы здания, в данном случае крученые стойки.

3.2.3. Экзокаркас как собственная выразительная самодостаточная форма

На (рис. 4–7) представлены основные этапы генерации авторской архитектурной формы, «Тропический цветок».

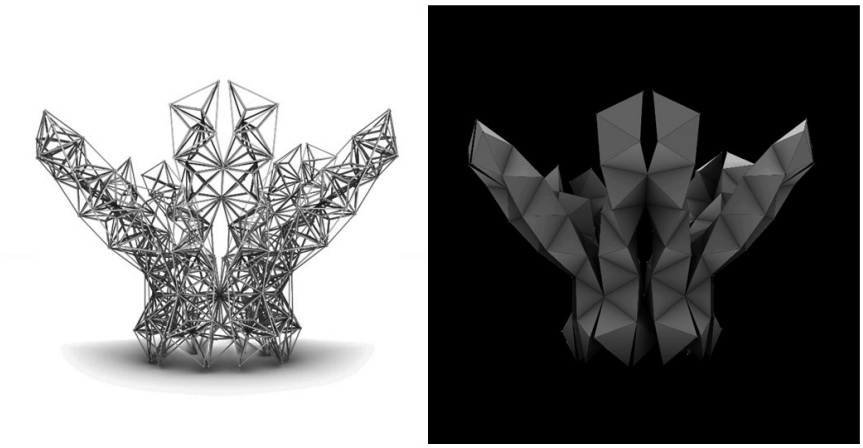
Благодаря бинарному решению и единой работе двух типов каркасов форма приобретает выразительный дизайн-код, однако экзокаркас здесь образует собственную достаточно выразительную форму.



a b

Рисунок 4 - Авторская архитектурная форма, «Тропический цветок»:
а) геометрия тесселяции экзокаркаса, выполненная в среде Rhino; *б)* для наглядности показаны траектории движения центроидов в форме
DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.6.4

 © Авторы статьи / Authors of the article



а б

Рисунок 5 - Авторская архитектурная форма, «Тропический цветок»:
а) экзокаркас с рабочими сечениями, стержней; *б)* внешний вид формы экзокаркаса с зашитыми внешними плоскостями, фасад
DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.6.5

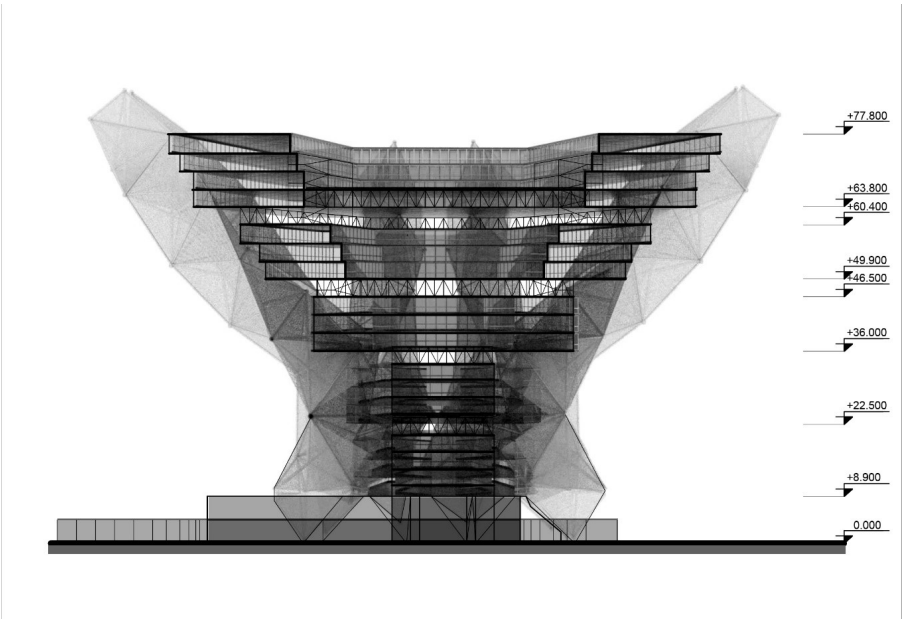


Рисунок 6 - Авторская архитектурная форма, «Тропический цветок»
DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.6.6

Примечание: расположение классических жестких дисков этажей в структуре экзокаркаса, схематический разрез

При наполнении экзокакасов жесткими дисками этажей, визуально можно представить два варианта оформления фасадов, (рис.7):

1. Разделение экзокаркаса от жестких дисков этажей различными фасадными материалами, при этом хорошо виден экзокаркас и параллельные жесткие диски этажей.
2. Экзокаркас и жесткие диски этажей образуют цельную форму благодаря единому остеклению.

 © Авторы статьи / Authors of the article





Рисунок 7 - Визуализация Авторской архитектурной формы, «Тропический цветок» с двумя вариантами каркасов
DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.6.7

3.2.4. Экзокаркас как отдельные Элементы здания, крученые стойки

Данная схема образует достаточно выразительную бинарную форму, (рис. 8), позволяя формировать свободную структуру параллельных дисков этажей. Схема позволяет уходить от центрального тяжелого ядра как распределителя, размещая вертикальные связи в крученых балках и освобождая достаточно ценное место внутреннего объема между стойками.

 © Авторы статьи / Authors of the article

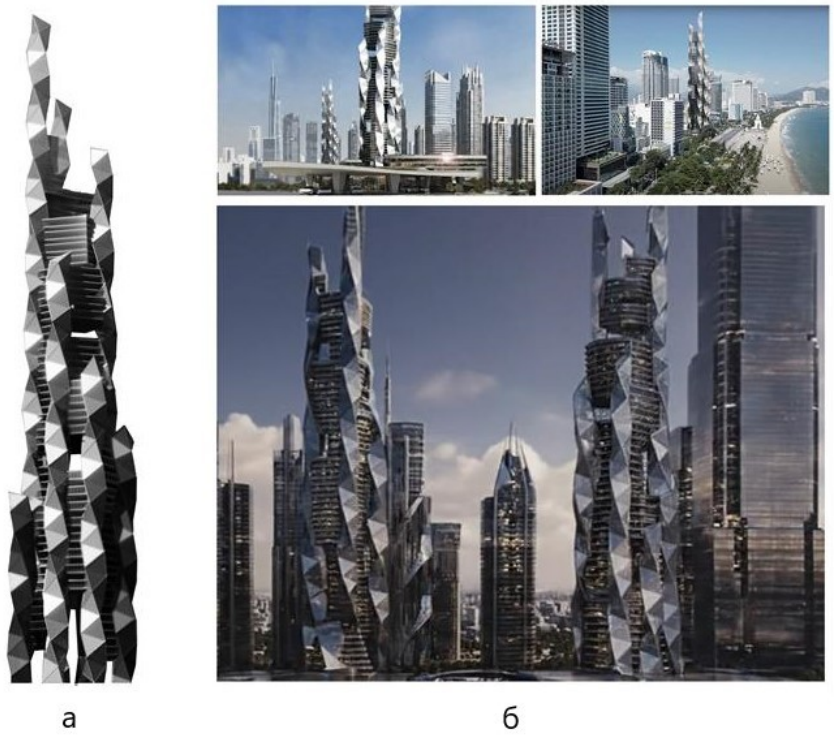


Рисунок 8 - Один из видов формообразования методом (ТММ). Визуализация Авторской архитектурной формы, форма «Вертикальный небоскрёб»:
а) совместная визуальная пластика крученых стоек каркаса и параллельных классических дисков этажей; *б)* визуализации пластического кода ТММ в городской среде

DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.6.8

Данная схема позволяет уходить от центрального тяжелого ядра как распределителя.

3.3. Пластические ограничения при формообразовании методом ТММ

При генерации цепочек теселяций для экзокаркасов архитектурных форм были выявлены определенные пластические ограничения, свидетельствующие о жестких правилах этих тесселяций. Здесь необходимо заметить, что монопараметрическое пространство, в силу своей топологической природы, представляет собой сложновизуализируемую структуру, где форма теряет привычную геометрическую ясность уже после нескольких шагов тесселяции [12]. Здесь визуальных возможностей представления формы может не хватить даже опытному архитектору. В этом случае архитектор уже на стадии поиска пластики работает с компьютером, анализируя цепочки развития форм, делая живые эскизы лишь для определения общей стратегии их развития [13]. Отсюда для работы с данными формами архитектору необходимы базовые знания теории комбинаторных форм в топологических пространствах [3], [4]. Также он должен чётко представлять различия между инвариантами данного метода и его изменяемой частью.

Инварианты (неизменная часть)

При проектировании методом ТММ архитектору необходимо четко разделять постоянные (инвариантные) параметры системы и ее трансформируемые элементы. К неизменным базовым свойствам относятся геометрические параметры самого тетраэдра (равенство ребер и углов), а также строгие комбинаторные правила соединения модулей «грань к грани», исключающие их деформацию или взаимное пересечение.

В то же время общая пространственная конфигурация экзокаркаса, связность отдельных цепей и итоговый визуальный облик здания остаются вариативными. Опора на жесткие геометрические инварианты позволяет архитектору сохранять контроль над проектированием, упорядочивая визуально хаотичную структуру и обеспечивая повторяемость конструктивных свойств объекта.

3.3.1. Особенности форм при работе с монопараметрическим пространством

1. ***Угловой дефицит***. На плоскости можно замкнуть 6 равносторонних треугольников (угол 60°). В случае тетраэдров пространственный угол между гранями составляет приблизительно 70,58°. При попытке замкнуть кольцо из 6 тетраэдров вокруг общей вершины возникает «перехлёст». В этом случае, если убрать один тетраэдр, мы получаем секторальный разрыв около 7°, где структура отсутствует (рис. 9). С точки зрения формообразования в каждом таком блоке появляются выразительные секторальные щели, которые могут быть использованы как проёмы или пластические акценты [8]. Жёсткость структуры при этом не особенно страдает, так как дальнейшая триангуляция по секторам этого блока образует жёсткие рукава или пластические лучи. Подобное свойство может являться локальным проявлением внутренней положительной кривизны пространства большей размерности [2]. В таком пространстве линии стремятся сойтись быстрее, чем в обычном евклидовом, следовательно, кольцевая конструкция из

 © Авторы статьи / Authors of the article

тетраэдров стремится быстрее схлопнуться, вызывая эффект пересечения и появления «избыточного сектора» [2], [12]. Достаточно наглядный пример: при изображении карты с глобуса мы её можем изобразить либо с большими искажениями, либо в разорванной секторальной проекции.

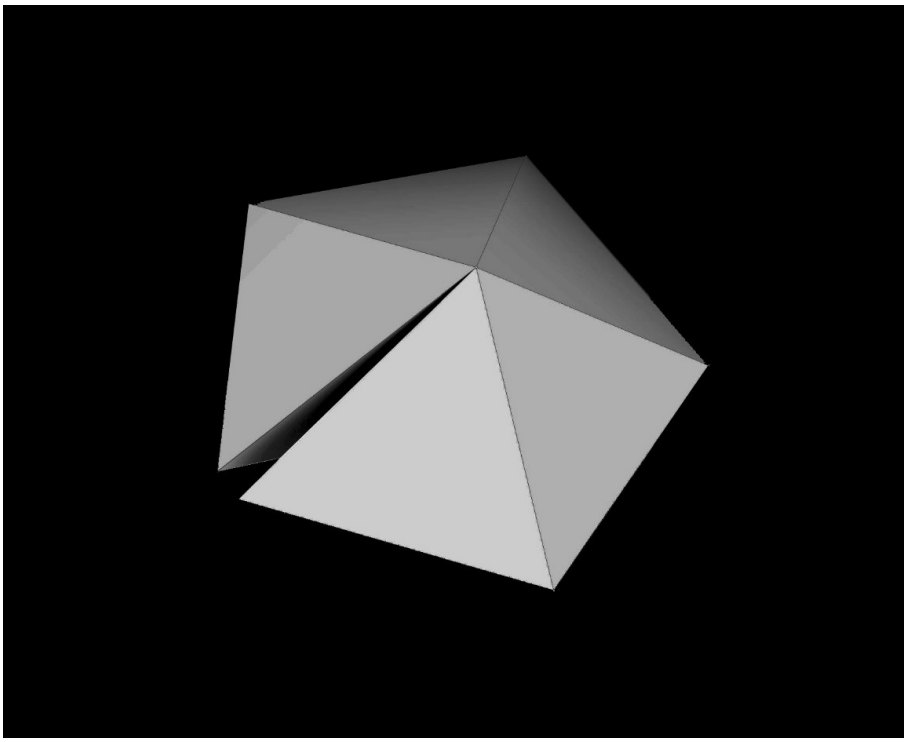


Рисунок 9 - Круговая тесселяция модуля. Хорошо видна секторальная щель ~7° возникающая при тесселяции пяти тетраэдров

DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.6.9

Примечание: графический материал разработан авторами

2. ***Алгоритмический дрейф*** — постоянное смещение координат вершин каждой последующей итерации относительно осей симметрии предыдущей.

В математике такая структура называется спиралью Бердийка — Коксетера. Она полностью апериодична, (или обладает трансляционной и вращательной непериодичностью). Структура закручивается бесконечно, а её вершины никогда не возвращаются в исходную позицию и не повторяют пространственный шаг один в один.

Отсюда следует, что мы никогда не сможем замкнуть эту цепочку в трехмерном пространстве. С точки зрения формообразования можно утверждать, что любая цепочка тесселяций, а значит, и часть формы уникальна и образует неповторимый пластический код, а незамыкаемость цепочек может быть использована как пластический приём для создания более выразительного художественного образа [8], [12], рис.10.

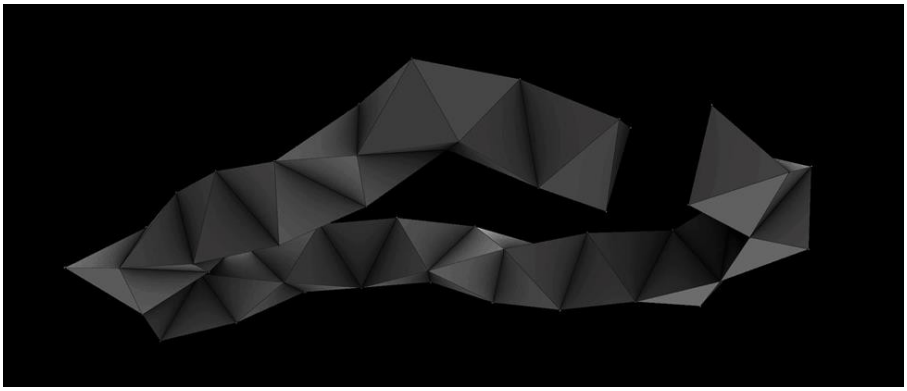


Рисунок 10 - В экзокаркасах структуры ТММ исключены замкнутые петли

DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.6.10

Примечание: графический материал разработан авторами

 © Авторы статьи / Authors of the article

3. ***Топологическая уникальность формообразования.*** Последовательность построения формы этим методом имеет абсолютно уникальный визуальный код — развитие из одной точки исключает возможность слияния, грань к грани, двух независимо развитых структур. Это положение логически вытекает из предыдущего. Форма «растёт» только из одной точки. Здесь наблюдается фундаментальное отличие от классического формообразования, где форма может собираться из отдельных частей [11]. Стоит заметить, что мы сейчас говорим об экзокаркасе как об отдельной самостоятельной структуре. Если привести пример экзокаркаса вертикального небоскреба, то мы увидим, что он имеет несколько автономных крученых стоек, по сути это несколько простейших экзокаркасов, каждый из которых развивается из своего локального начального модуля и соединяется с соседними стойками лишь жесткими горизонтальными дисками этажей.

4. ***Непланарность и проблема визуализации.*** Выше упоминалось, что пространство, образованное подобным методом, достаточно иррационально и визуально плохо фиксируемо [3], [12]. При данном формообразовании вообще исчезает понятие стойки и балки. Вместо них приходит самофиксируемая и саморегулируемая пространственная организация формы [2], [8]. Получаемая структура непланарна — её невозможно корректно отобразить на плоскости без пересечений. В отличие от традиционной архитектуры, где фасады дают ясное представление об объёме, здесь даже детальная ортогональная проекция не передаёт реальной сложности формы. Это требует новых методов подачи проектов — например, интерактивных 3D-моделей или голографических визуализаций [9], [13]. В этом случае проект может представлять собой чертёж модуля и карту маршрутизации с указанием координат центроидов модулей [8]. В пластическом отношении это можно рассматривать как фирменный стиль, где все формы уникальны и неповторимы.

5. ***Комбинаторная запутанность схем формообразования.*** К специфическим особенностям форм, созданных рассматриваемым методом, можно отнести топологическую комбинаторную запутанность схем формообразования для объектов, которые планируются быть сложнее относительно небольших, достаточно простых и легко визуализируемых форм (например, спиралевидных балок или незамкнутых лент Мёбиуса) [2], [12]. При работе с крупными формами архитектор буквально пошагово воспроизводит на экране монитора фрагменты формы, возвращаясь назад, стирая созданные цепочки и понимая, что зашёл в топологический тупик, (рис 11) [13]. Автор часто начинает осознавать пластику возникающей формы только в момент компьютерной визуализации. Таким образом, форма до последнего остаётся неразгаданной, проявляясь и озаряя автора в момент формообразования. Творчество здесь часто проявляется как эвристическое озарение при котором топологически верная решенная задача, образует достаточно чистую форму, (рис. 12) [8], [13].

 © Авторы статьи / Authors of the article

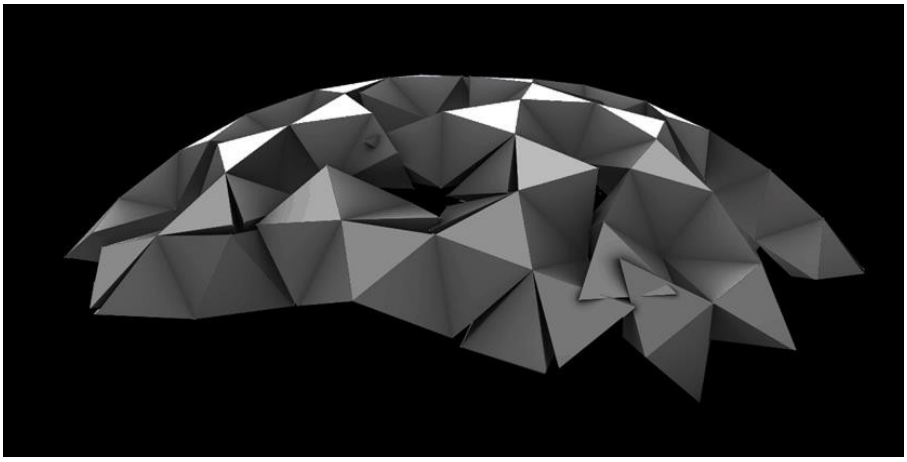


Рисунок 11 - Комбинаторная запутанность схем формообразования часто приводит к «лохматости» формы: неконтролируемые пересечения и тупиковые маршруты тесселяций ведут к общему разрушению формы
DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.6.11

Примечание: графический материал разработан авторами

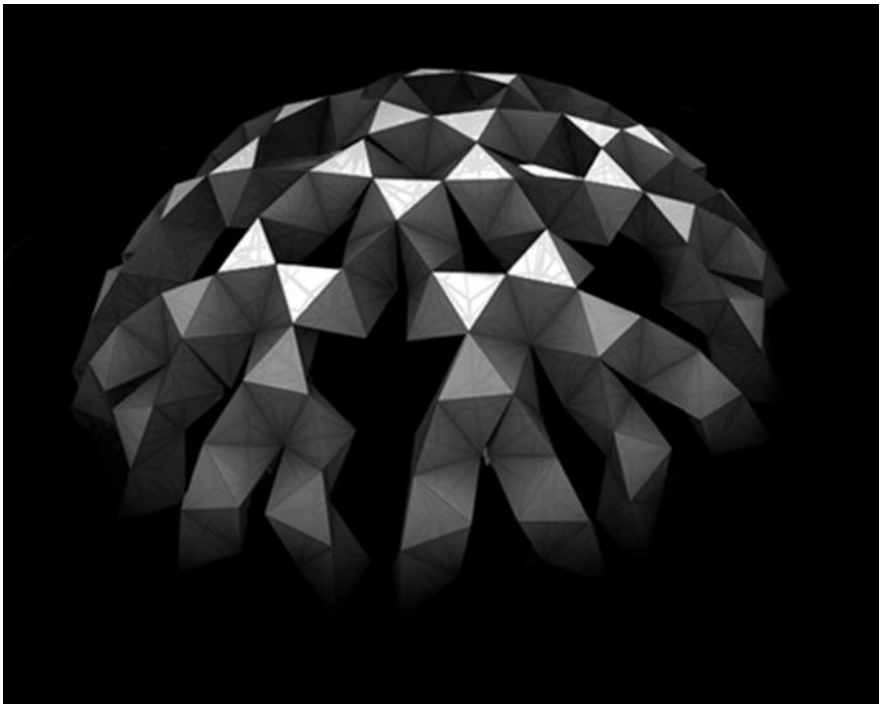


Рисунок 12 - Топологически верно решённая задача образует достаточно чистую форму
DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.6.12

Примечание: графический материал разработан авторами

Обсуждение

4.1. Сравнительный анализ мировых объектов биоморфизма с формами, созданными методом ТММ

В мировой архитектуре биоморфизм часто служит воплощением авторского замысла, соединяя природные образы с символическим подтекстом [1].

1. Фариборз Сахба. Храм Лотоса, Нью-Дели. Его лепестковая структура имитирует цветок лотоса, превращая здание в символ духовной чистоты (рис. 13).

2. Фрэнк Гери. Музей Гуггенхайма, Бильбао. Титановые изгибы фасадов рождают ассоциации с живыми формами: от рыбьей чешуи до раскрывающегося бутона (рис. 14).

3. Питер Кук и Колин Фурнье. Кунстхаус, Грац. Его медиафасад и аморфные очертания напоминают морской организм, подчёркивая диалог между историей и футуризмом (рис. 15).

4. Работы Сантьяго Калатравы — кинетические структуры, где архитектура становится «живой» скульптурой, сочетая био-тек и инженерный экспрессионизм [7]. (рис. 16).

 © Авторы статьи / Authors of the article



Рисунок 13 - Фариборз Сахба. Храм Лотоса, Нью-Дели
DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.6.13

Примечание: источник [15]



Рисунок 14 - Фрэнк Гери. Музей Гуггенхайма в Бильбао
DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.6.14

Примечание: источник [16]

 © Авторы статьи / Authors of the article



Рисунок 15 - Кунстхаус в городе Грац — музей, галерея современного искусства
DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.6.15

Примечание: источник [17]



Рисунок 16 - Сантьяго Калатрава. Художественный музей в Милуоки
DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.6.16

Примечание: источник [18]

Однако в этих примерах биоморфизм достигается за счёт свободного формообразования, где материал подчиняется художественному замыслу [1].

В отличие от этого, рассматриваемый метод предлагает иной подход: биоморфные свойства заложены в самой структуре экзокаркасов, а ограничения метода (например, жёсткость геометрических модулей), как было сказано выше, становятся его преимуществом, отображая достаточно уникальный дизайн-код объекта.

Заключение

Полученные теоретические результаты показывают, что метод трансметрического монопараметризма (ТММ) формирует уникальный дизайн-код, определяющий границы его архитектурного применения и задающий особый язык формы [8], [13]. ТММ — это методологическая рамка, предложенная авторами; которая позволяет системно описывать процессы формообразования с заданными свойствами в тетраэдрических структурах [8].

 © Авторы статьи / Authors of the article

Главное тектоническое отличие предложенного подхода от существующих систем адаптации и пассивного тенсегрити (Р. Б. Фуллер) [10] заключается в переводе внешних деструктивных усилий в контролируемое скалярное давление внутренней среды, регулируемое в режиме реального времени [8].

Ограничения метода, связанные с жесткостью исходных геометрических модулей и угловым дефицитом, при детальном анализе переходят в разряд проектных преимуществ. Характерные секторальные щели и незамыкаемость тесселяционных цепочек выступают готовыми пластическими приемами для интеграции световых проемов и формирования уникальных биоморфных силуэтов [1]. Таким образом, архитектор уходит от свободного поверхностного формообразования к структурно детерминированному соавторству с геометрическими законами природы.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Сообщество рецензентов журнала «Современное строительство и архитектура».
DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.6.17

Conflict of Interest

None declared.

Review

Community of Reviewers of the Modern Construction and Architecture.
DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.6.17

Список литературы / References

1. Добрицына И.А. Концепции биоморфизма и параметризма в современной архитектуре: проблемы и перспективы / И.А. Добрицына // Academia. Архитектура и строительство. — 2019. — № 3. — С. 51–57.

2. Коксетер Г.С.М. Введение в геометрию / Г.С.М. Коксетер; пер. с англ. — Москва : Наука, 1966. — 648 с.

3. Коротич А.В. Архитектоника плотнейших пространственных структур из плоскогранных модулей / А.В. Коротич // Дизайн и технологии. — 2022. — № 91–92(133–134). — С. 210–220.

4. Лебедева Г.С. Архитектура и дизайн: Анализ концепции тотального дизайна Р.Б. Фуллера / Г.С. Лебедева // Архитектура СССР. — 1973. — № 1. — С. 58–61.

5. Возможности адаптивной архитектуры // Информационно-аналитический журнал / ООО «Издательство «Зодчий». — СПб., 2023. — С. 18–22.

6. Патент № 2867044 Российская Федерация, МПК F16F 15/023 (2006.01). Пространственная стержневая замкнутая шарнирная конструкция, содержащая пространственные стержневые замкнутые шарнирные конструкции в виде соединённых между собой равносторонних тетраэдров с медианами в качестве модулей: № 2025130659: заявл. 05.11.2025: опубл. 28.07.2026 / М.А. Храмова. — 4 с.

7. Пименова Е.В. Динамическая архитектура: трансформация фасадов общественных зданий / Е.В. Пименова, Л.М. Демидова // Инженерный вестник Дона. — 2017. — № 1. — URL: http://ivdon.ru (дата обращения: 17.09.2026).

8. Храмов И.В. Четырехмерная архитектура — метафора или реальность? / И.В. Храмов, П.Н. Григорьев, П.И. Ипатова // Инженерный вестник Дона. — 2025. — № 12(72). — URL: http://ivdon.ru (дата обращения: 17.09.2026).

9. Fox M. Interactive Architecture: Adaptive World / M. Fox. — New York : Princeton Architectural Press, 2016. — 176 p.

10. Fuller R.B. Synergetics: Explorations in the Geometry of Thinking / R.B. Fuller, E.J. Applewhite. — New York : Macmillan Publishing Co. Inc., 1975. — 876 p.

11. Hensel M. Emergence: Morphogenetic Design Strategies / M. Hensel, A. Menges, M. Weinstock // Architectural Design. — 2004. — Vol. 74, № 3.

12. Meng W. Topological design and morphogenetic computation of space truss structures / W. Meng, Q. Li // Automation in Construction. — 2021. — Vol. 124. — Art. 103568. — DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103568.

13. Oxman R. Thinking difference: Theories and models of parametric design thinking / R. Oxman // Design Studies. — 2017. — Vol. 52. — P. 4–39. — DOI: 10.1016/j.destud.2017.06.001.

14. Senatore G. Exploring the application domain of adaptive structures / G. Senatore, P. Duffour, P. Winslow // Engineering Structures. — 2018. — Vol. 167. — P. 608–628. — DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.03.075.

15. Храм Лотоса (Нью-Дели, Индия): архитектурный анализ // ARCHITIME.RU. — URL: https://www.architime.ru/specarch/fariborz_sahba/lotus_temple.htm (дата обращения: 17.10.2026).

16. Музей Гуггенхайма в Бильбао: Деконструктивизм Фрэнка Гери // ARCHITIME.RU. — URL: https://www.architime.ru/specarch/frank_gehry_2/guggenheim_museum.htm (дата обращения: 17.10.2026).

17. Кунстхаус (Грац). — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Кунстхаус_(Грац) (дата обращения: 17.10.2026).

18. Музей искусств Милуоки: Кинетический павильон Сантьяго Калатравы // ARCHITIME.RU. — URL: https://www.architime.ru/specarch/santiago_calatrava/burke_brise_soleil.htm (дата обращения: 17.10.2026).

Список литературы на английском языке / References in English

1. Dobritsyna I.A. Kontseptsii biomorfizma i parametrizma v sovremennoy arkhitekture: problemy i perspektivy [Concepts of biomorphism and parametrism in modern architecture: problems and prospects] / I.A. Dobritsyna // Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo [Academia. Architecture and Construction]. — 2019. — № 3. — P. 51–57. [in Russian]

2. Coxeter G.S.M. Vvedeniye v geometriyu [Introduction to geometry] / G.S.M. Coxeter; transl. from English. — Moscow : Nauka, 1966. — 648 p. [in Russian]

 © Авторы статьи / Authors of the article

3. Korotich A.V. Arkhitektonika plotneyshikh prostranstvennykh struktur iz ploskogrannykh moduley [Architectonics of the densest spatial structures made of flat-faced modules] / A.V. Korotich // Dizayn i tekhnologii [Design and Technologies]. — 2022. — № 91–92(133–134). — P. 210–220. [in Russian]

4. Lebedeva G.S. Arkhitektura i dizayn: Analiz kontseptsii total'nogo dizayna R.B. Fullera [Architecture and design: Analysis of the concept of total design by R.B. Fuller] / G.S. Lebedeva // Arkhitektura SSSR [Architecture of the USSR]. — 1973. — № 1. — P. 58–61. [in Russian]

5. Vozmozhnosti adaptivnoy arkhitektury [Possibilities of adaptive architecture] // Informatsionno-analiticheskiy zhurnal [Information and Analytical Journal] / Publishing House "Zodchiy" LLC. — St. Petersburg, 2023. — P. 18–22. [in Russian]

6. Patent № 2867044 Rossiyskaya Federatsiya, MPK F16F 15/023 (2006.01). Prostranstvennaya sterzhnevaya zamknutaya sharnirnaya konstruktsiya, soderzhashchaya prostranstvennyye sterzhnevyye zamknutyye sharnirnyye konstruktsii v vide soyedinennykh mezhdu soboy ravnostoronnikh tetraedrov s medianami v kachestve moduley [Spatial rod closed hinged structure containing spatial rod closed hinged structures in the form of interconnected equilateral tetrahedra with medians as modules] : № 2025130659 : filed 05.11.2025 : published 28.07.2026 / M.A. Khramova. — 4 p. [in Russian]

7. Pimenova E.V. Dinamicheskaya arkhitektura: transformatsiya fasadov obshchestvennykh zdaniy [Dynamic architecture: transformation of facades of public buildings] / E.V. Pimenova, L.M. Demidova // Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don]. — 2017. — № 1. — URL: http://ivdon.ru (accessed: 17.09.2026). [in Russian]

8. Khramov I.V. Chetyrekhmernaya arkhitektura — metafora ili real'nost'? [Four-dimensional architecture — metaphor or reality?] / I.V. Khramov, P.N. Grigoriev, P.I. Ipatova // Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don]. — 2025. — № 12(72). — URL: http://ivdon.ru (accessed: 17.09.2026). [in Russian]

9. Fox M. Interactive Architecture: Adaptive World / M. Fox. — New York : Princeton Architectural Press, 2016. — 176 p.

10. Fuller R.B. Synergetics: Explorations in the Geometry of Thinking / R.B. Fuller, E.J. Applewhite. — New York : Macmillan Publishing Co. Inc., 1975. — 876 p.

11. Hensel M. Emergence: Morphogenetic Design Strategies / M. Hensel, A. Menges, M. Weinstock // Architectural Design. — 2004. — Vol. 74, № 3.

12. Meng W. Topological design and morphogenetic computation of space truss structures / W. Meng, Q. Li // Automation in Construction. — 2021. — Vol. 124. — Art. 103568. — DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103568.

13. Oxman R. Thinking difference: Theories and models of parametric design thinking / R. Oxman // Design Studies. — 2017. — Vol. 52. — P. 4–39. — DOI: 10.1016/j.destud.2017.06.001.

14. Senatore G. Exploring the application domain of adaptive structures / G. Senatore, P. Duffour, P. Winslow // Engineering Structures. — 2018. — Vol. 167. — P. 608–628. — DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.03.075.

15. Khram Lotosa (N'yu-Deli, Indiya): Arkhitekturnyy analiz [Lotus Temple (New Delhi, India): Architectural analysis] // ARCHITIME.RU. — URL: https://www.architime.ru/specarch/fariborz_sahba/lotus_temple.htm (accessed: 17.10.2026). [in Russian]

16. Muzey Guggenkhayma v Bil'bao: Dekonstruktivizm Frenka Geri [Guggenheim Museum in Bilbao: Frank Gehry's Deconstructivism] // ARCHITIME.RU. — URL: https://www.architime.ru/specarch/frank_gehry_2/guggenheim_museum.htm (accessed: 17.10.2026). [in Russian]

17. Kunstkhus (Grats) [Kunsthaus (Graz)]. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Kunstkhus_(Grats) (accessed: 17.10.2026). [in Russian]

18. Muzey iskusstv Miluoki: Kineticheskiy pavil'on Sant'yago Kalatravy [Milwaukee Art Museum: Santiago Calatrava's Kinetic Pavilion] // ARCHITIME.RU. — URL: https://www.architime.ru/specarch/santiago_calatrava/burke_brise_soleil.htm (accessed: 17.10.2026). [in Russian]