

Четырехмерная архитектура – метафора или реальность?

И.В. Храмов¹, П.Н. Григорьев², П.И. Ипатова¹

¹Санкт-Петербургский Государственный Архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург

²ООО "РеалСтрой"

Аннотация: Данная статья знакомит с новым методом создания архитектурных объектов, способных эффективно противостоять техногенным угрозам. Инновационность конструктивных схем основана на уникальной концептуальной двойственности: система может анализироваться как в традиционной трёхмерной парадигме передачи воздействий, так и с помощью принципиально новой четырёхмерной ресурсной модели перераспределения напряжений. Каким образом эта модель обеспечивает активное управление ресурсами и адаптацию конструкции к изменяющимся условиям? Этому вопросу посвящена данная работа.

Ключевые слова: трансформация, четырехмерная архитектура, пространственные стержневые конструкции, техногенные угрозы, трансметрический монопараметризм, крученая пространственная балка, пентахорон, четырехмерный симплекс

Введение

Архитектура, традиционно воспринимаемая как наука об организации пространства, исторически тяготела к статичности как в физическом, так и в концептуальном смысле. Воплощая в себе принципы застывшей гармонии, кристаллической геометрии и монументальности, архитектурные сооружения, даже в рамках таких радикальных направлений как деконструктивизм и параметризм [1], оставались ограничены рамками трехмерного пространства Евклида.

Данная многовековая приверженность трехмерности обусловлена не только материальными ограничениями, но и семиотической функцией архитектуры. Существующие концепции "темпоральной" или "четырёхмерной" архитектуры [2], акцентирующие внимание на динамических и адаптивных свойствах зданий, следует рассматривать скорее как метафорические конструкции, нежели как реализацию подлинной многомерности. Акцент на адаптивности и трансформации во времени безусловно является важным, однако он не выходит за рамки описания

изменений, происходящих с трехмерным объектом в рамках существующей пространственно-временной системы координат [3].

Настоящая работа предлагает принципиально иной подход, основанный на применении аппарата многомерной геометрии для создания архитектурных объектов, выходящих за рамки традиционной трехмерности.

Речь идет не о новых материалах или технологиях, а о принципиально новом способе управления внутренними усилиями в конструкции за счет эксплуатации ранее не задействованного ресурса, в рамках которого происходит новая трансформация и перераспределение напряжений в системе.

В отличие от классических методов, рассматривающих конструкцию как статичный объект, предложенная концепция предполагает такое управление внутренними силами, которое позволит вывести баланс их в конструкции объекта из жестко фиксированной трехмерной схемы и перераспределить его на четырехмерную модель, понимаемую здесь как математическая абстракция, обеспечивающая большую степень свободы в оптимизации напряженно-деформированного состояния системы.

Последнее утверждение определяет некое участие четырехмерной модели как математической абстракции, однако рассматриваемую модель можно уверенно описать и как трехмерную схему, где происходит процесс смены способа передачи воздействий от жестких стержней каркаса к жидкой среде гидросистемы, причем все свойства объекта остаются такими же, как и в четырехмерной модели. И все же некоторые аспекты работы объекта в пограничных условиях достаточно сложно описать классической трехмерной схемой. Ниже: описание, что из себя представляет четырехмерная модель и чем она отличается от классической трехмерной модели.

Суть метода трансметрического монопараметризма. История возникновения метода

Для начала необходимо определить суть метода, а также увидеть актуальность и востребованность объектов, создаваемых на его основе. В данном случае нужно заметить, что данная концепция формирования архитектурного объема не претендует на глобальное лидерство в традиционном архитектурном формообразовании. Однако, ключевые свойства объектов, приобретаемые в рамках этой концепции, позволяют говорить об абсолютной ее актуальности и значимости в свете современных вызовов, связанных с техногенной деятельностью цивилизации и нарастающими природными угрозами.

На сегодняшний день очевидно, что современный мир испытывает острую потребность в решениях, способных эффективно противостоять глобальным технологическим рискам. С уверенностью можно сказать, что предлагаемый подход формирует специфическую форму, созданную как ответ на техногенные угрозы. Мы определяем ее как архитектуру техногенеза – архитектуру, предназначенную для функционирования в пограничных условиях техногенного характера. Именно по этой причине она не стремится к доминированию в общепринятых методах формообразования.

Тем не менее, важно отметить, что новые, более жесткие правила формообразования для иррациональных пространств, заложенные в этой методике помимо заявленных базовых свойств, порождают неожиданно новую эстетику. Этот аспект позволяет утверждать, что у предлагаемого способа формообразования есть потенциал для развития как у самостоятельного направления в рамках архитектуры техногенеза.

Разработанный нашей исследовательской группой метод трансметрического монопараметризма (ТММ; трансметрический монопараметризм: трансметрический – передающий свойства через

размерность; монопараметризм – формирующий форму одним параметром) и основанный на нем способ формирования трансметрической формы, по своей сути, представляет собой мощный инструмент для комплексного решения техногенных задач путем активного управления свойствами объекта в режиме реального времени [4]. Это позволит в дальнейшем решать такие практические задачи при реализации различных проектов как:

1. Высокоэффективное восприятие вибрационных воздействий на несущую конструкцию.
2. Минимизация влияния собственных частот колебаний конструкций.
3. Значительное повышение безопасности и устойчивости сооружений при сейсмическом воздействии.
4. Активное управление жесткостью объекта, мгновенное активное восприятие внешних нагрузок и максимально эффективное их перераспределение в элементах несущей конструкции.

Трансметрический монопараметризм (ТММ) предполагает принципиально иной подход, основанный на строгих математических принципах и детерминированной проекции, что однозначно делает его инновационным. Однако, возникновению метода предшествовали объективные причины, корнящиеся в длительной эволюции инженерной мысли и философии проектирования, которые создали необходимые предпосылки для его появления. Для более лучшего понимания места данной методики в формировании общей визуальной «объектности» исторические предшественники и аналоги метода были разделены на два обширных класса:

1. *Пространственные стержневые конструкции (инженерно-расчетные решения)*

Александр Гюстав Эйфель – Эйфелева башня (1889); Владимир Шухов – сетчатые висячие покрытия (завод в Выксе, 1897) (рис. 1); гиперboloидные башни, арочные конструкции (ГУМ, Киевский вокзал); Ричард Бакминстер

Фуллер – геодезический купол [5, 6]; Купол «Климатрон» в Сент-Луисе в Миссури, 1960 год (рис. 2); Н. В. Никитин – Останкинская башня (1967). Все вышеперечисленные объекты являются по сути инженерными прототипами, как пространственные структуры [7, 8].



Рис. 1. – Радиомачта системы инженера В.Г. Шухова (Шуховская башня). Москва, 1922 год. Фотография: Архив Российской академии наук, Москва

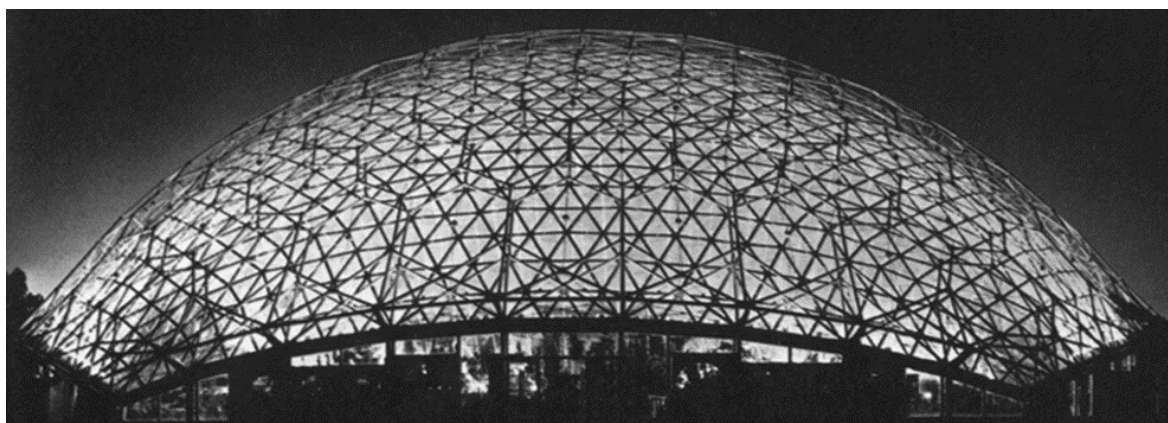


Рис. 2. – Купол «Климатрон» в Сент-Луисе в Миссури, 1960 год [9].

2. Авторские художественные интерпретации (символические решения)

Даниэль Либескинд – Еврейский музей в Берлине (рис. 3), Кристалл Майкла Ли-Чина, Денверский художественный музей; Соор Himmelb(l)au – Кинотеатр UFA-Palast в Дрездене; Фрэнк Гери – Музей Гуггенхайма в Бильбао, Центр здоровья мозга Лу Руво; Питер Айзенман – Дом VI. Эти объекты являются больше прототипами иррациональности формы.

Особое место занимает творчество Ричарда Бакминстера Фуллера с его идеями архитектуры тенсегрити и геодезическими куполами, которые являются наиболее близким инженерным аналогом [10, 11].

Отдельно следует отметить параметризм (Заха Хадид, Патрик Шумахер), который концептуально близок идее использования параметра (рис. 4) [12].



Рис. 3. – Даниэль Либескинд: Еврейский музей в Берлине
Фото: Jens Ziehe/Photographie



Рис. 4. – Заха Хадид. Здание для пожарной части в Вайле-на-Рейне.
Фото: Christian Richters

Однако ключевое отличие трансметрического монопараметризма (ТММ) от метода параметризма заключается в использовании единственного формообразующего инварианта (тетраэдра) для детерминированного управления свойствами объекта, а не множества параметров для создания сложной формы.

Таким образом, даже наиболее передовые из рассмотренных концепций ограничены решением задач трёхмерного пространства. Концепция ТММ же, ориентированная так или иначе на использование свойств высших размерностей для создания адаптивных структур, функционирующих в экстремальных техногенных условиях, практически не имеет аналогов в истории архитектурной науки. Причем объекты, созданные методом ТММ, могут быть описаны как абсолютно трехмерные формы со смешанной формой передачи воздействий в структуре, так и как гипотетические четырехмерные формы, где передача воздействий ориентирована на последние расчетные методики передачи энергии в жидких средах. На рисунке 5 (рис. 5) видны как конструктивная инженерная схема, так и иррациональная пластика объекта.



Рис. 5. – Один из пластических видов объектов, созданный методом ТММ

Основные принципы работы метода трансметрического монопараметризма

Рассмотрим ряд принципов формирования объектов методом трансметрического монопараметризма (ТММ), их работу и способность образования нужных свойств объекта. Стоит подчеркнуть: исключительно совместная работа этих принципов создаёт основу для проектирования архитектурных форм с беспрецедентными показателями адаптивности, устойчивости и структурной эффективности, формируя новый класс архитектурных объектов.

- *Принцип четырёхмерной проекционной детерминированности*

Геометрия и локация всех ключевых узлов трёхмерной конструкции является строгой детерминированной проекцией (в частности, тенью или сечением) соответствующей многомерной формы-оригинала (например, четырёхмерного симплекса — пентохорона).

- *Принцип трансформации природы усилий*

В зонах проекции ключевых узлов способ передачи механических усилий фундаментально меняется. Классические виды внутренних напряжений — растяжение, сжатие, сдвиг и изгиб — трансформируются в управляемое барицентрическое давление.

- *Принцип триангуляционной чистоты формообразования*

Единственным допустимым и исчерпывающим методом генерации трёхмерной формы объекта является триангуляция минималистичного и идеально симметричного модуля — равностороннего тетраэдра. Этот процесс исключает создание избыточной геометрической информации, обеспечивая максимальную эффективность.

В целом можно описать способ формообразования подобным методом как определенную триангуляцию (способ соединения) модуля, наделенного системой, с изменяющимися параметрами напряжения.

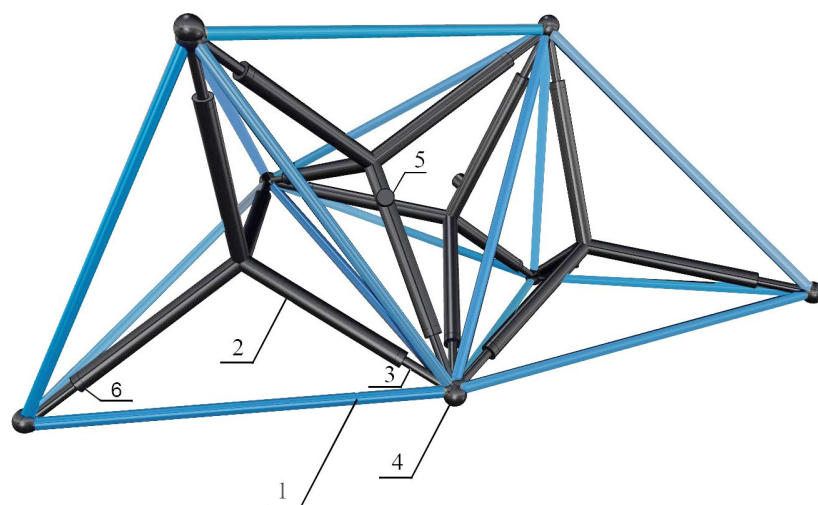


Рис. 6. – Пространственный код образования форм методом ТММ

На рисунке 6 хорошо виден пространственный код образования форм методом ТММ (рис. 6), также на рисунке 6: 1 – стержни-ребра тетраэдра; 2 – стержни-медианы (общая рабочая камера в виде 4 полых емкостей); 3 – стержни-медианы (штоки гидросистемы); 4 – шарнир системы; 5 – механизм для управления давлением (нагнетатель давления).

Пространственный код формообразования транслирует все 3 принципа:

1. Пересечение медиан модуля, является проекцией четырехмерного симплекса.
2. Гидросистема трансформирует способ передачи воздействий в стержневых системах.
3. Триангуляция модуля таким образом, что стержни-ребра одного модуля являются стержнями ребрами другого модуля. Это единственный способ формирования макроформы.

На рисунке 7 показана одна из возможных форм, созданных методом ТММ – крученая пространственная балка (рис. 7). Так как диэдральный угол равностороннего тетраэдра составляет $\arccos(1/3)$, что приблизительно составляет 70,53 градуса, конструкция с таким

соединением тетраэдров не имеет параллельных поясов, на вид абсолютно биоморфна и представляет собой пространственную конструкцию в виде крученой балки.

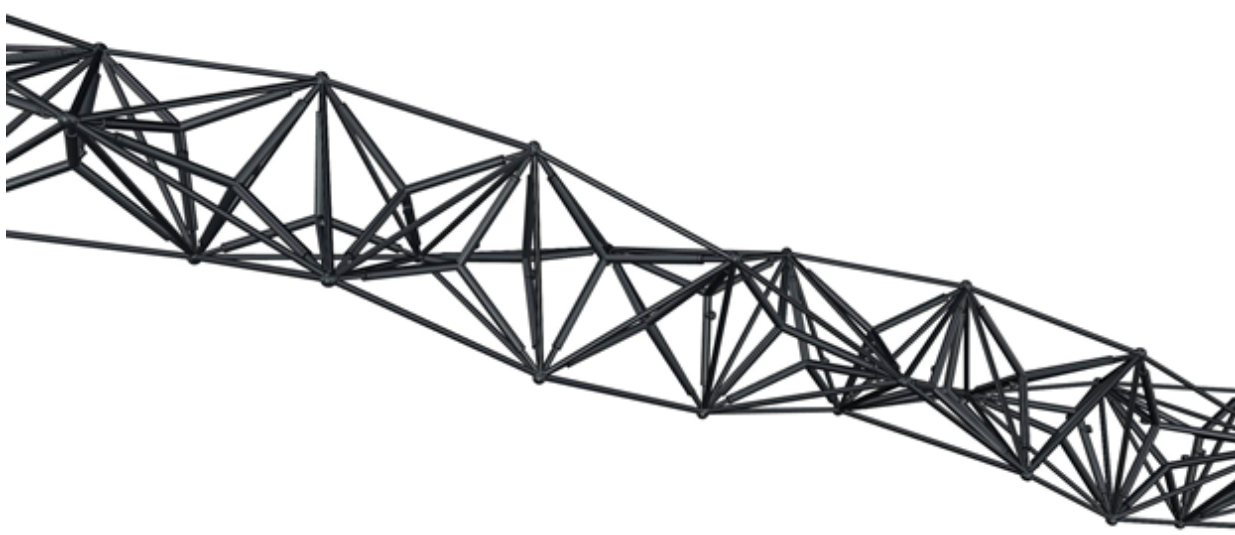


Рис. 7. – Биоморфная крученная пространственная балка

Трехмерная форма или четырехмерная модель?

К определению четырехмерной модели более всего тяготеет 1 и 2 принцип. Именно здесь рассматриваются некие параметры, которые можно интерпретировать как четырехмерные. Рассмотрим их подробнее.

Принцип 1. Четырёхмерная проекционная детерминированность

Если рассматривать схему модуля равностороннего тетраэдра с медианами и интерпретировать ее как проекцию четырехмерного симплекса на трехмерный правильный тетраэдр трехмерного пространства, то точка пересечения медиан правильного тетраэдра (центроид) – это проекция центроида четырехмерного симплекса и его пятой вершины (рис. 6). Причем сами медианы правильного тетраэдра тоже являются проекциями как медиан идущих к центроиду четырехмерного симплекса, так и ребер, идущих от вершин правильного тетраэдра к пятой вершине четырехмерного симплекса. Таким образом, формируется модель, где центральная часть, медианы и

центроид строго детерминированы как проекции структуры высшей размерности. Такая схема в действительности является геометрической моделью, удобной для описания специфики работы тетраэдра.

Принцип 2. Трансформация природы усилий

В зонах проекции ключевых узлов способ передачи и перераспределения физико-механических внутренних усилий в основной конструкции фундаментально меняется. Классические виды внутренних напряжений — растяжение, сжатие, сдвиг и изгиб — трансформируются в управляемое барицентрическое давление (рис. 6).

Для более точного понимания принципа рассматривается работа модуля (тетраэдра с медианами) как работа жесткой стержневой системы.

Условно примем направление воздействия на тетраэдр по всем вершинам в качестве вектора извне в направлении к центру по линии медиан. Тогда со всех вершин данные воздействия будут собираться в центроиде, сжимая стержни медиан. Кроме того, стержни ребер тетраэдра при такой модели нагрузки также будут сжиматься. Увеличивая воздействие на модуль подобным образом достигается точка, когда конструкция тетраэдра с медианами теряет геометрическую устойчивость и начинает критически деформироваться и разрушаться. При этом в общей схеме жесткости модуля (как и в с схеме потери несущей способности) медианы играют главную роль, а ребра тетраэдра – второстепенную. Так условно выглядит работа модуля как жесткой стержневой пространственной системы.

Если в систему медиан поставить гидросистему в виде общей рабочей камеры со штоками, ориентированными в вершины тетраэдра (рис. 6), то образуется иная картина работы модуля в целом. При нагнетании давления в гидросистему штоки с одинаковыми усилиями будут равномерно раздвигать каркас тетраэдра, делая его ребра предварительно растянутыми в области упругой деформации. Допуская равномерное воздействие извне на все

вершины тетраэдра, а также упругость предварительно растянутых стержней, суммарные воздействия будут стремиться «сжать» каркас тетраэдра обратно, сажая всю конструкция в буквальном смысле на гидроподушку и демпфируя ее. Кроме того, возможно увеличение несущей способности каркаса, т.к. при увеличении воздействия извне, изначально усилия будут компенсироваться предварительным напряжением с обратным знаком и только потом оставшаяся часть усилий будет воспринята несущим элементом. Очевидно, что возможное значение восприятия абсолютной величины воздействия во втором случае будет отличаться в большую сторону, чем в первом.

Все подобные изменения в силовой схеме модуля возможны лишь благодаря изменению характера передачи воздействия. В первом случае в жесткой структуре вектор воздействия передается строго в направлении ориентации стержня. Во втором случае мы наблюдаем равномерное перераспределение внутренних усилий и увеличение общей жесткости (несущей способности) за счет ресурса вторичных элементов (ребер тетраэдров), «закон Паскаля». Последнее утверждение позволяет сделать выводы о возможности максимального использования мгновенного активного восприятия и перераспределения внутренних усилий в системе. В целом, можно остановиться и на трехмерной схеме, но «применение гидросистемы в пространственной стержневой трехмерной структуре позволяет демпфировать систему, более равномерно перераспределять усилия в ней и сгладить напряжения в узлах».

Законы гидростатики и гидродинамики очень точно определяют перенос энергии в жидкости из точки А в точку В. Однако если мы рассмотрим первый принцип метода ТММ и добавим к геометрической четырехмерной модели симплекса физическую модель переноса воздействия в жидкости по масштабу, внутрь или во вне, то в этом случае необходимо принять модель воздействия среды ориентированной определенным образом

на геометрическую модель четырехмерного симплекса, а значит принять тот факт, что воздействие распространяется на пятую вершину пентахорона и на центроид четырехмерного симплекса. Это, в свою очередь, значит, что их следует учитывать в схеме перераспределения усилий. Таким образом, последовательная логика в данном случае привела к определению четырехмерной работы модуля.

Если говорить о переносе воздействия в среде по масштабу, необходимо заметить, что в настоящее время подобные методики, существуют:

1. **Конвекция** (крупномасштабный, организованный перенос)
2. **Турбулентный перенос** (перенос за счет вихрей разного масштаба)
3. **Теплопроводность** (молекулярный, микроскопический перенос)
4. **Излучение** (перенос электромагнитными волнами, не требующий среды)

Метод трансметрического монопараметризма (ТММ) на данный момент будет проходить стадию НИОКР. В процессе апробации опытных образцов пространственных конструкций группой будут поставлены эксперименты, подтверждающие или исключающие передачу воздействия через размерность (рис. 8).

На рисунке 9 (рис. 9): стадии образования трансметрической формы. 1 – геометрическая модель; 2 – рабочая схема каркаса; 3 – объемная модель трансметрической формы; 4 – совместная работа трансметрической формы и классической концепции параллельных поясов.

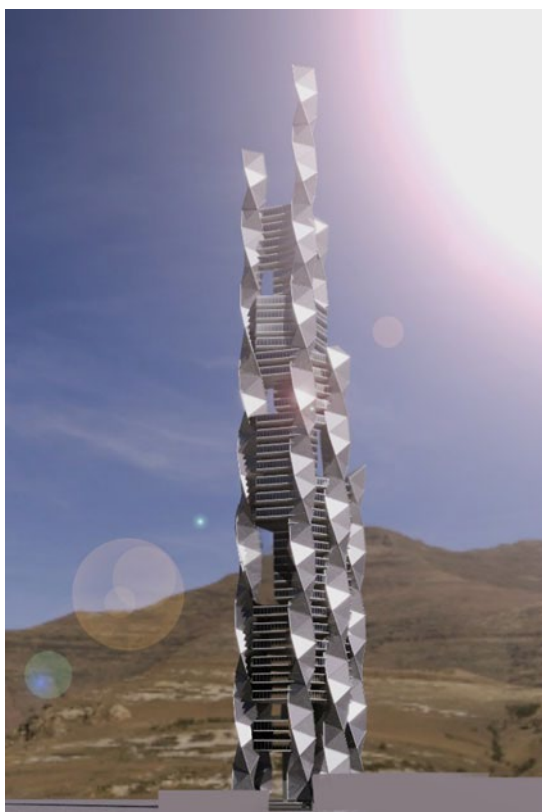


Рис. 8. – Возможное применение биоморфной крученой пространственной балки в высотном домостроении

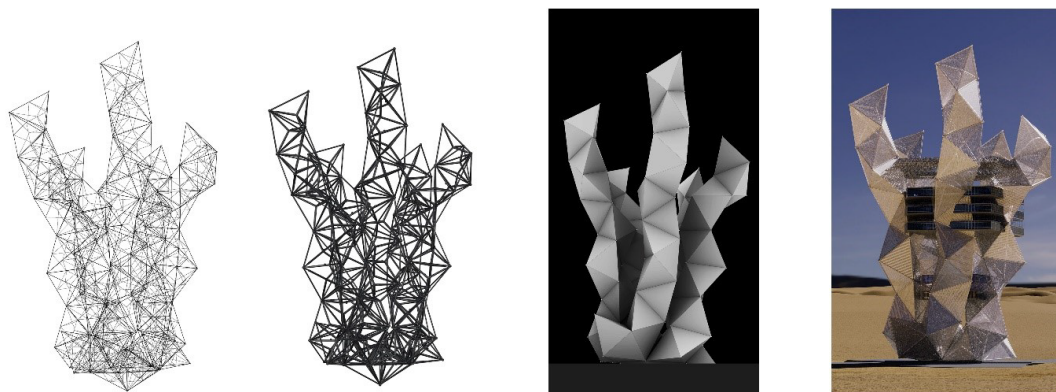


Рис. 9. – Стадии образования трансметрической формы

Вывод

Как было показано выше, трехмерная схема с изменением способа передачи воздействия в системе медиан наглядно работает, однако

четырёхмерная модель, пока теоретически, позволяет системе вести себя более стабильно в пограничных условиях (сложение вибраций, ротор векторов с изменяемыми направлениями и т.д.), где разрушающие напряжения в конструкции даже при полной балансировке невозможно будет убрать.

Таким образом, уже на теоретическом уровне ясно, что четырёхмерная архитектура перестаёт быть метафорой и заявляет о себе как о новой инженерно-архитектурной реальности, способной изменить парадигму архитектурной формы в прямом и переносном смысле.

Литература

1. Добрицына И. Концепции биоморфизма и параметризма в современной архитектуре: проблемы и перспективы. Academia. Архитектура и строительство, 2019, (3), сс. 51–57.
2. Пименова Е.В., Демидова Л.М. Динамическая архитектура: трансформация фасадов общественных зданий // Инженерный вестник Дона, 2017, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4081/.
3. Возможности адаптивной архитектуры. Информационно-аналитический журнал. ООО «Издательство «Зодчий». Санкт-Петербург, 2023. Сс. 18–22.
4. П.И. Ипатова, М.А. Храмова К вопросу о формообразовании в архитектуре // Инженерный вестник Дона, 2024, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2024/9084/.
5. Лебедева Г. Архитектура и дизайн: анализ концепции тотального дизайна Р.Б. Фуллера. Архитектура СССР, 1973. № 1., с. 58–61.
6. Седов В. Купола Фуллера. Проект классика, 2002. №4., с.104-111
7. Копытов М., Пляскин А. Пространственные стержневые конструкции покрытий. Томск, ISBN: 978-5-93057-895-9. С. 104.

8. Лившиц И.Е. Особенности расчета стержневых пространственных конструкций. Стройиздат. Ленинград. 1968, с. 240.
9. М. Элькина. Ричард Бекминстер Фуллер: многогранник как предчувствие. URL: artelectronics.ru/posts/richard-bakminster-fuller-mnogogrannik-kak-predchuvstvie
10. Ференчик П., Тохачек М. Предварительно напряженные стальные конструкции. 1979, с. 424.
11. Fuller R.B. A Visionary Architect. The Green Lane™. Environment Canada's. URL: biosphere.ec.gc.ca/The_sphere/Richard_Buckminster_Fuller-WS30956246-1_En.htm.
12. Schumacher P. The Autopoiesis of Architecture. A New Framework for Architecture. London: John Wiley & Sons Ltd., vol. 1, 2010., pp. 632.

References

1. Dobricyna I. Academia. Arxitektura i stroitel'stvo, 2019, (3), pp. 51–57.
2. Pimenova E.V., Demidova L.M. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4081/.
3. Informacionno-analiticheskij zhurnal. ООО «Izdatel'stvo «Zodchij». Sankt-Peterburg, 2023. Pp. 18-22.
4. Ipatova P., Khramova M. Inzhenernyj vestnik Dona, 2024, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2024/9084/.
5. Lebedeva G. Arxitektura SSSR, 1973. № 1. pp. 58–61.
6. Sedov V. Kupola Fullera [Fuller Domes]. Proekt klassika, 2002. №4. pp.104-111
7. Kopy'tov M., Plyaskin A. Prostranstvenny'e sterzhnevyye konstrukcii pokry'tij [Spatial core structures of coatings]. Tomsk, ISBN: 978-5-93057-895-9. P. 104.



8. Livshicz I.E. Osobennosti rascheta sterzhnevy`x prostranstvenny`x konstrukcij [Features of calculating rod spatial structures]. Strojizdat. Leningrad. 1968, p. 240.
9. M. E`l`kina. Richard Bekminster Fuller: mnogogrannik kak predchuvstvie. URL: artelectronics.ru/posts/richard-bakminster-fuller-mnogogrannik-kak-predchuvstvie
10. Ferenchik P., Toxachek M. Predvaritel`no napryazhenny`e stal`ny`e konstrukcii [Prestressed steel structures]. 1979, p. 424.
11. Fuller R.B. A Visionary Architect. The Green LaneTM. Environment Canada's. URL: biosphere.ec.gc.ca/The_sphere/Richard_Buckminster_Fuller-WS30956246-1_En.htm.
12. Schumacher P. The Autopoiesis of Architecture. A New Framewor for Architecture. London: John Wiley & Sons Ltd., vol. 1, 2010. p. 632

Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.

Дата поступления: 10.10.2025

Дата публикации: 20.11.2025