

А.А Буртовенко; научн. рук. – М.Н. Городова
A.A. Burtovenko; scientific advisor – M.N. Gorodova

Алгоритмическая архитектура: От топологической оптимизации к программируемой материи
Algorithmic Architecture: From Topology Optimization to Programmable Matter

Ключевые слова: алгоритмическое проектирование, топологическая оптимизация, аддитивное производство, 3D-печать, 4D-печать, роевая робототехника, программируемая материя, BIM, бионическая архитектура, роботизированная материя.

Keywords: algorithmic design, topology optimization, additive manufacturing, 3D printing, 4D printing, swarm robotics, programmable matter, BIM, bionic architecture, robotic matter.

Аннотация: В статье рассматривается смена парадигмы в архитектуре под влиянием вычислительных алгоритмов. Анализируется переход от статичной формы «застывшей музыки» к концепции «роботизированной материи», где конструкция, материал и процесс возведения объединены цифровым расчетом. Особое внимание уделяется методам топологической оптимизации, технологиям аддитивного производства, принципам роевого интеллекта в строительстве и потенциалу 4D-печати как инструментам создания адаптивных и ресурсоэффективных зданий.

Abstract: The article examines a paradigm shift in architecture influenced by computational algorithms. It analyzes the transition from the static form of «frozen music» to the concept of «robotic matter,» where structure, material, and construction process are integrated through digital computation. Special attention is paid to topology optimization methods, additive manufacturing technologies, the principles of swarm intelligence in construction, and the potential of 4D printing as tools for creating adaptive and resource-efficient buildings.

Алгоритмическая архитектура: От топологической оптимизации к программируемой материи

Долгое время архитектуру, вслед за метафорой Гёте, воспринимали как «застывшую музыку» — статичную композицию, завершённую и неизменную в момент постройки. Однако в XXI веке это представление фундаментально меняется под давлением цифровой трансформации [4, 5]. Строительная отрасль, долгое время остававшаяся одной из наименее цифровизированных сфер (по данным McKinsey, уровень внедрения технологий здесь почти вдвое ниже, чем в промышленности), сегодня переживает этап ускоренной алгоритмизации. Традиционный процесс, основанный на последовательных чертежах и иерархическом управлении, уступает место вычислительному проектированию [4]. Здание перестаёт быть просто реализацией художественного замысла и становится физическим воплощением сложного вычислительного процесса — «роботизированной материей», где форма, структура, материал и способ производства объединены единой цифровой логикой на всех этапах жизненного цикла: от концепции и анализа нагрузок до управления роботами на стройплощадке и последующей эксплуатации [1, 5].

Основой этой трансформации служит топологическая оптимизация — математический метод распределения материала в заданном объеме, направленный на достижение максимальной жесткости конструкции при минимальной массе (См. Ил. 1) [2]. В инженерной механике эта задача формулируется как минимизация податливости конструкции. Алгоритм итеративно удаляет «лишний» материал из ненагруженных зон, порождая ветвящиеся, биоморфные структуры, напоминающие губчатую ткань костей птиц или фрактальную систему ветвей деревьев, где каждый элемент передает нагрузку по оптимальной траектории (См. Ил. 2) [2]. Экономический эффект от применения данного

подхода позволяет значительно снизить материалоемкость и повысить эффективность конструкций [2]. Для индустрии, генерирующей около 38% мировых выбросов CO₂, подобная оптимизация материалоемкости является не просто экономией, а экологическим императивом. Ярким примером реализации таких принципов служит амстердамский мост MX3D Bridge, напечатанный промышленными роботами методом послойной сварки (См. Ил. 3) [1]. Особенностью объекта является интеграция цифровых датчиков, которые создают «цифровой двойник» физического объекта для мониторинга его состояния [1].

Логическим продолжением цифрового расчета формы становится аддитивное производство. Традиционная архитектура во многом была скована экономикой опалубки и тиранией прямой линии, так как любая сложная кривизна требовала изготовления дорогостоящих форм. 3D-печать строительными смесями, полимерами или глиной снимает это фундаментальное ограничение: в новой парадигме стоимость изготовления уникальной криволинейной детали или целого объема равна стоимости типовой панели [6]. Это разрушает принцип стандартизации, делая массовую кастомизацию экономически оправданной [6]. Проекты, такие как TECLA House (WASP, Италия), или Office of the Future в Дубае, демонстрируют сокращение строительных отходов и сроков строительства (См. Ил. 4) [6]. Технология рассматривается как ключевая для освоения удаленных территорий и автоматизированного строительства [6].

На уровне организации самого строительного процесса происходит переход от централизованной иерархии к децентрализованным системам и роботизации [1, 5]. Традиционная стройка жестко иерархична и уязвима к сбоям, тогда как цифровые и роботизированные системы обеспечивают большую гибкость и устойчивость [1]. Вдохновленные природными механизмами самоорганизации, автономные роботы действуют по локальным правилам, формируя сложные структуры (См. Ил. 5) [5]. Параллельно развивается роботизация традиционных процессов: автоматизированные системы кладки и сборки значительно повышают производительность и снижают зависимость от человеческого труда [1].

Вершиной алгоритмической интеграции становится программируемая материя и 4D-печать. В отличие от статичных объектов, материалы начинают изменять свои свойства и геометрию во времени под воздействием внешних факторов [3]. Используются термоактивные полимеры, сплавы с памятью формы и гигроскопические материалы. Примером служит павильон HygroSkin, работающий за счет свойств материала без использования механики или электроники (См. Ил. 6) [2, 3]. Эта логика продолжается в проектах Института вычислительного проектирования и строительства (ICD/ITKE), где создаются биомиметические структуры с использованием роботизированного производства [2].

Таким образом, современная архитектура переживает фундаментальный сдвиг: от строительства как механической сборки дискретных элементов к выращиванию целостной формы, управляемому данными. Архитектор будущего оперирует не только эстетическими категориями, но и алгоритмами, параметрическими моделями и данными о поведении материалов [4, 5]. Здание эволюционирует из статичного монумента в динамическую, адаптивную систему [3]. Происходит синтез архитектуры, инженерии, биологии и вычислительных технологий, что соответствует концепции нелинейной и сложной архитектуры [7].

Список иллюстраций:

Иллюстрация 1. Процесс топологической оптимизации детали: сравнение исходного объёма и оптимизированной бионической формы.

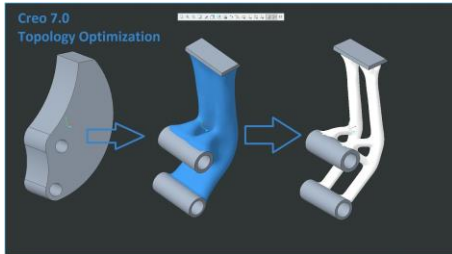


Иллюстрация 2. Бионическая форма конструкции колонны и навеса.



Иллюстрация 3. MX3D Bridge, Амстердам: роботизированная сварка и общий вид.



Иллюстрация 4. Office of the Future, Дубай: первое напечатанное офисное здание (17 дней).



Иллюстрация 5. Система TERMES, MIT: автономные роботы для сборки блочных конструкций.

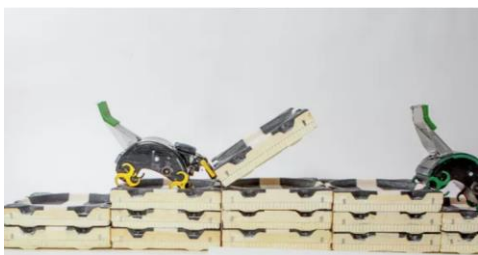


Иллюстрация 6. HygroSkin Pavilion: адаптивный фасад, реагирующий на влажность.



Иллюстрация 7. Робот-каменщик Hadrian X: укладка до 1000 кирпичей в час.



Список литературы:

1. Fabio Gramazio, Matthias Kohler, Silke Langenberg. *Fabricating Architecture: Selected Readings in Digital Design and Manufacturing*. — Baden: Lars Müller Publishers, 2014.
2. Jan Knippers, Achim Menges. *Biomimetic Research for Architecture and Building Construction*. — Cham: Springer, 2020.
3. Neri Oxman. *Material Ecology*. — New York: The Museum of Modern Art, 2020.
4. Branko Kolarevic. *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. — New York: Spon Press, 2003.
5. Rivka Oxman, Robert Oxman (eds.). *The New Structuralism: Design, Engineering and Architectural Technologies*. — London: Wiley, 2010.
6. Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker. *Additive Manufacturing Technologies*. — New York: Springer, 2015.

7. Irina Dobritsyna. Нелинейная архитектура и архитектура сложности. — М.: URSS, 2014.