

ВНЕДРЕНИЕ ЦИФРОВЫХ МЕТОДОВ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ АРХИТЕКТУРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 721:004.9

DOI: 10.24412/1998-4839-2021-1-268-278

М.С. Салех

Московский архитектурный институт (государственная академия), Москва, Россия

Аннотация

В статье рассматриваются основные направления развития цифровых методов в архитектурной практике, приводятся характерные примеры их использования на различных стадиях проектирования. Исследование доказывает возможность эффективного внедрения современных инструментов анализа и проектирования при решении творческих архитектурных задач.¹

Ключевые слова: цифровые методы, алгоритмическое проектирование, генеративное моделирование, параметрическая архитектура, топологические оптимизации, генетические алгоритмы, агентные системы, физические симуляции

IMPLEMENTATION OF DIGITAL METHODS AT DIFFERENT STAGES OF ARCHITECTURAL DESIGN

M. Saleh

Moscow Institute of Architecture (State Academy), Moscow, Russia

Abstract

This article discusses main trends in development of digital methods in architectural practice, provides typical examples of their use at various stages of design. The study proves the possibility of effective implementation of modern analysis and design tools in solving creative architectural problems.²

Keywords: digital methods, algorithmic design, generative modeling, parametric architecture, topological optimizations, genetic algorithms, agent-based systems, physical simulations

Цифровые методы архитектурного проектирования постоянно развиваются, принося новые возможности как для архитектурного формообразования, так и для непосредственного строительства здания. Для понимания степени эффективности прикладных характеристик того или иного инструмента важным и актуальным является анализ и оценка возможностей существующих методов генеративного и параметрического проектирования и демонстрация их применения на конкретных архитектурных объектах. Целью представленного исследования является классификация различных генеративных методов и их адресное применения на основных стадиях проектирования: концепция, проектная документация, рабочая документация.

¹ **Для цитирования:** Салех М.С. Внедрение цифровых методов на различных этапах архитектурного проектирования // Architecture and Modern Information Technologies. – 2021. – №1(54). – С. 268–278. – URL: https://marhi.ru/AMIT/2021/1kvart21/PDF/18_saleh.pdf
DOI: 10.24412/1998-4839-2021-1-268-278

² **For citation:** Saleh M. Implementation of Digital Methods at Different Stages of Architectural Design. Architecture and Modern Information Technologies, 2021, no. 1(54), pp. 268–278. Available at: https://marhi.ru/AMIT/2021/1kvart21/PDF/18_saleh.pdf DOI: 10.24412/1998-4839-2021-1-268-278

Чтобы ответить на вопрос – на каком этапе и каким образом можно оптимизировать проектирование (сократить его сроки и затрачиваемую рабочую силу)? – необходимо рассмотреть влияние генеративных и параметрических методов на работу архитектора на различных стадиях проектирования (рис. 1).

Основные группы генеративных методов в рамках архитектурного формообразования и проектирования

1. Генетические (эволюционные) алгоритмы

1.1. Метод генетических алгоритмов основывается на эвристическом алгоритме поиска наиболее оптимизированного решения с использованием механизмов, аналогичных естественному отбору в природе. Целью этого метода является поиск наиболее правильных решений с точки зрения заданных параметров и ограничений, он может решать архитектурные задачи, выдавая различные варианты.

1.2. Самыми распространенными инструментами метода генетических алгоритмов в среде программы Rhinoceros и Grasshopper (встроенный компонент визуального программирования) являются плагины Octopus и Galapagos, работающие на базе визуального программирования.

Алгоритм работы эволюционного алгоритма заключается в следующей последовательности:

- *Начальный этап* характеризуется созданием случайного набора решений.
- *Пригодность* – оценка пригодности каждого решения с точки зрения необходимых параметров.
- *Новая популяция* – создание новых решений на основе необходимых параметров.
- *Выбор* – происходит на основе необходимых параметров.
- *Рекомбинация* – из двух лучших решений создать третье наилучшее.
- *Мутация* – некоторые изменения популяции для более совершенного решения.
- *Выбор* – отказ от новых решений.
- *Замена* старой популяции на новую.
- *Проверка* полученной популяции на решение поставленной проблемы.
- *Остановка или повторение процедуры* генерации решений проблемы.

1.3. Характерным примером применения генеративных методов в архитектурном формообразовании является проект Многофункционального жилого комплекса исследователей из Университета штата Небраска Nate Holland. Проект многоэтажного жилого дома показывает, как может работать генеративный дизайн, а точнее – процесс оптимизации, основанный на «правиле», которое обеспечит высотные квартиры лучшими видами. В начале строится 3D модель окружения: здания, транспортные и пешеходные пути, площади. Затем задаются ограничения: границы участка, площадь застройки, расстояния до существующих зданий и т.д. Galapagos, анализируя различные комбинации, выбирает наилучший вариант пятна застройки, подходящий заданным требованиям. Затем приступает к оптимизации верхнего уровня, выстраивая визуальные линии от пола этажа до береговой линии. Также выполняется оптимизация нижележащих уровней. В результате, Galapagos выдает множество возможных решений, которые анализируются и отсортировываются командой проектировщиков. Каждое из этих решений отвечает функциональным и эстетическим требованиям.

Кроме того, эволюционные алгоритмы зачастую применяются в совокупности с другими инструментами генеративных алгоритмов, как, например, компонент Ladybug, который анализирует климатические условия места проектирования. Таким образом генетический алгоритм (инструмента Galapagos) совместно с компонентом Ladybug дает возможность подобрать оптимальную форму здания с точки зрения инсоляции и других климатических особенностей местности.

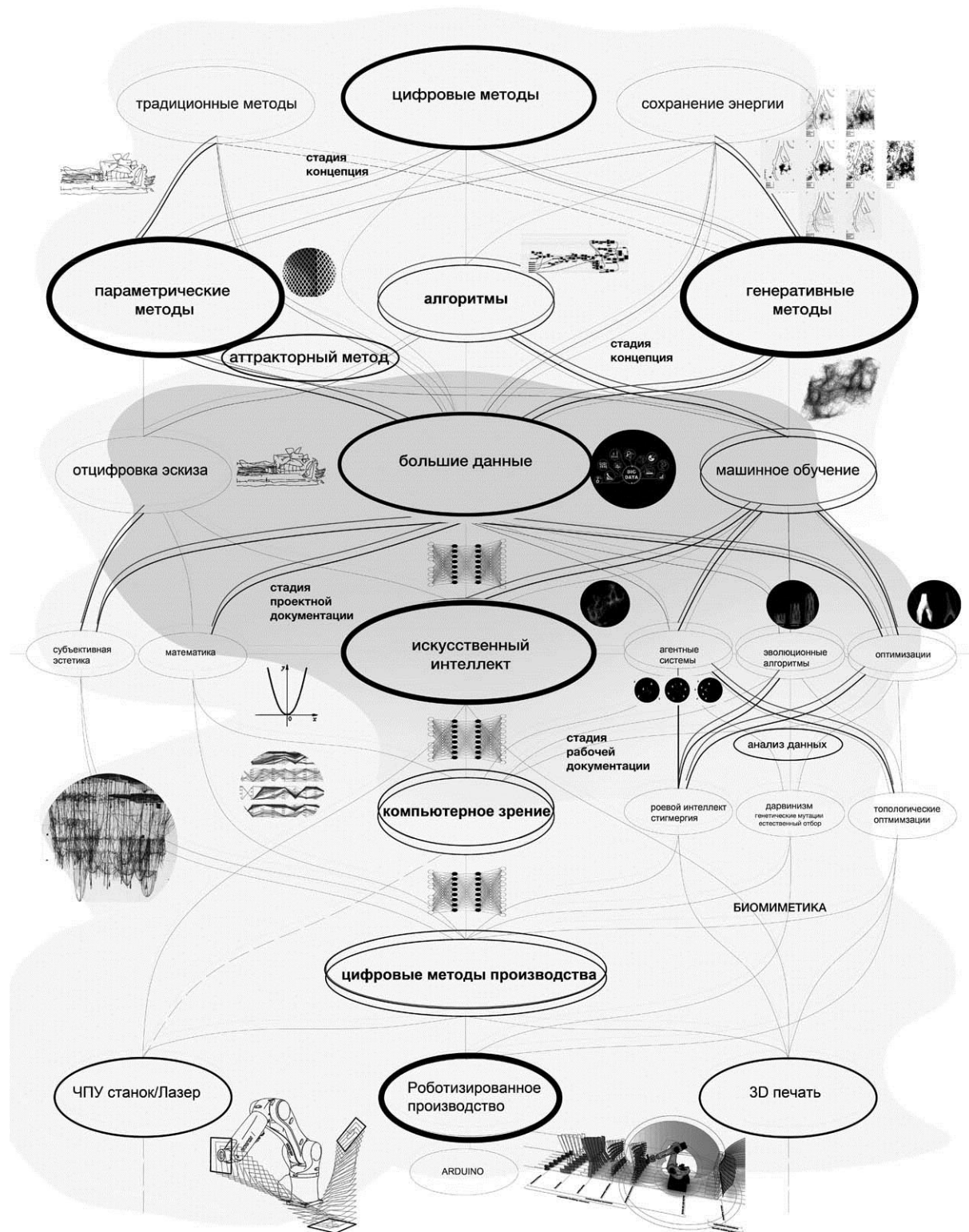


Рис. 1. Схема распределения цифровых методов на различных этапах архитектурного проектирования

1.4. Результат внедрения генетических алгоритмов в архитектурное проектирование имеет неоценимый результат в контексте устойчивого развития, оптимизации геометрии здания с точки зрения климатических и функциональных особенностей. Кроме того,

эволюционные алгоритмы выдают большое количество различных вариантов решений, удовлетворяющих заданные параметры.

2. Топологические оптимизации

2.1. Метод топологических оптимизаций – это итеративный вычислительный процесс, который работает в ограниченном дискретном пространстве. Для заданных нагрузок и опор алгоритм уточнит распределение материалов для достижения заданного набора целевых показателей производительности. Существует ряд различных алгоритмов оптимизации топологии, включая твердую изотропную микроструктуру с пенализацией (SIMP), эволюционную структурную оптимизацию (ESO) и топологические производные [7]. Несмотря на вычислительные различия между этими алгоритмами, все они создают семейство типичных геометрических элементов: взаимосвязанные сети из тонких ребер и узких трубчатых структур с динамическими изменениями пористости. Цель применения топологических оптимизаций заключается в структурной оптимизации геометрии исходя из ее исходных параметров, нагрузок, опор, материала и других факторов.

2.2 Основным инструментом топологических оптимизаций является компонент Millipede для программы Rhinoceros, на платформе визуального языка программирования Grasshopper.

Алгоритм работы метода топологических оптимизаций:

- Создание исходной 3D модели в программе Rhinoceros, перенос геометрии в среду программы Grasshopper.
- Задание основных исходных параметров подгруженной геометрии в программе Millipede.
- Расположение опор, нагрузок (с указанием количества), выбор материала модели.
- Создание компьютерного кода методом визуального программирования в Grasshopper с помощью необходимых компонентов программы Millipede.
- Получение результата топологической оптимизации – белые участки (необходимая геометрия), черные участки (незадействованные места в работе конструкции).
- Остановка или повторение процедуры генерации новых топологических оптимизаций на исходной геометрической модели, но с другими исходными параметрами (альтернативные нагрузки, материалы конструкции, расположение опорных элементов), либо повторение процедуры топологической оптимизации на получившейся геометрии из первой итерации на предмет производства – генерация геометрии в зависимости от вида цифрового производства (с учетом ограничений по 3D печати или многоосевом фрезеровании).

2.3. Характерным примером применения метода топологических оптимизаций является экспериментальный проект навеса на трех опорах, разработанный учеными департамента Цифровых строительных технологий Федерального института технологий в Цюрихе. Для того, чтобы продемонстрировать внедрение метода топологических оптимизаций в архитектуре, прототипы представляют собой крупномасштабные примеры сборных бетонных плит размером $1,8 \times 1 \text{ м}^2$ – полный размер 3D-принтера Ex-One S-MAX. Прототип «А» был разработан посредством гибридного процесса, основанного на оптимизации топологии и разбивки на сетку. Основная цель процесса оптимизации состояла в том, чтобы уменьшить количество материала до 0,2 заданной доли от начального количества при минимизации деформации плиты и равномерной нагрузке на поверхность. Граничные условия задавались тремя неподвижными опорами.

Площадь плиты была разделена на 135 000 узлов, и алгоритм выполнялся в течение 500 циклов, создавая растровое изображение в градациях серого, представляющее распределение материала. Данное растровое изображение было впоследствии векторизовано и получило трехмерную ребристую топологию на основе цветовых значений, соответствующих определенным узлам. Наконец, были применены алгоритмы Катмулла-Кларка и циклического разбиения для получения гладкой поверхности и учета

производственных ограничений. Алгоритмы разделения были выборочно применены для эстетической дифференциации ребер и полей.

2.4. Результат внедрения метода топологических оптимизаций в архитектурное формообразование имеет неоценимый результат в рамках экономии материала, улучшенных прочностных характеристиках структуры. Кроме того, использование метода топологических оптимизаций дает возможность получить уникальную геометрию, обладающую новыми художественными характеристиками.

3. Агентные системы

3.1. Метод агентных систем – это действия, образованные несколькими взаимодействующими интеллектуальными агентами. Цель применения данного метода в архитектурном и градостроительном формообразовании заключается в генерации оптимизированных структур на основе исходных параметров путем внедрения биомиметически-самоорганизующихся процессов. Существуют различные виды агентных систем – стигмергические (самоорганизация термитов) и роевые (движение стаи птиц), в зависимости от органического существа, с которого была списана модель поведения алгоритма.

3.2. Основными инструментами агентных систем являются такие компоненты для программы визуального программирования Grasshopper, как Pedsim, Quelea, Physarealm и другие. Эти компоненты были разработаны на основе изучения и выявления определенных характеристик поведения некоторых микробов, людей, стай птиц, рыб, животных.

Алгоритм применения метода агентных систем значительно отличается от остальных генеративных методов, так как в данном случае на начальном этапе нет исходной геометрии (нет отправной точки). Таким образом, процедура работы с агентными методами сводится к следующим действиям:

- Разработка компьютерного кода, методом визуального программирования Grasshopper, с применением определенных компонентов агентных систем на основе исходных правил и ограничений, по которым будет развиваться будущая структура.
- Предварительное моделирование и расстановка точек притяжения и отталкивания агентов, с указанием силы (притяжения или отталкивания). А также ввод дополнительных (при необходимости) данных – как например препятствия, с указанием геометрических параметров и расположение в пространстве.
- Запуск процесса генерации структуры агентными системами.
- Остановка процесса генерации агентных самоорганизаций на определенном этапе.
- Повторение процесса генерации структуры агентными системами (при необходимости).

3.3. Теоретическим примером эффективности агентных систем является исследование микроба *P. Polyserphalum*, на основе которого разработан компонент для Grasshopper Physarealm, один из самых простых для выращивания в культуре эукариотических микробов, который использовался в качестве модельного организма для многих исследований, связанных с движением амебоидов и подвижностью клеток. Группа японских и венгерских исследователей показала, что *P. polyserphalum* может решить проблему кратчайшего пути. При выращивании в лабиринте с овсяными хлопьями на двух участках *P. polyserphalum* удаляется отовсюду в лабиринте, кроме самого короткого пути, соединяющего два источника пищи.

Примером применения методов агентных систем в архитектурном формообразовании является проект пирса архитектора Сатору Сугихара из Лаборатории архитектурных технологий. Проект был разработан с использованием алгоритмов техники роевого интеллекта для создания выразительных футуристических образований из металлического кабеля, а также было проведено физическое моделирование для оптимизации структуры по отношению к сжимающимся конструкциям фермы.

3.4. Результат внедрения метода агентных систем в процесс архитектурного формообразования имеет большой потенциал в связи с генерацией архитектурных решений на основе природных законов самоорганизации. Такой подход помогает достигать высоких показателей в контексте устойчивого развития и новой художественной эстетики зданий и сооружений.

4. Симуляции

4.1. Еще одним важным методом генеративного моделирования является метод симуляций, целью которого является оценка (анализ) потенциала структуры и процесс экспериментального формообразования. Симуляция, которой можно подвергнуть исходную модель, может иметь различный характер – естественный (ветер, осадки, землетрясение, солнечная радиация, гравитация), искусственный – (скручивание, моделирование сценариев нагрузочных симуляций архитектором).

4.2. Основным инструментом симуляции является плагин для Grasshopper–Kangaroo, который имеет большое количество различных компонентов физических симуляций. Алгоритм работы метода симуляций варьирует в зависимости от конечной цели. В рамках архитектурного формообразования:

– *Выбор исходной примитивной геометрии*, над которой будет производиться эксперимент (например, плоскость) и выбор компонента симуляции (например, ветровая нагрузка и гравитация).

– *Подготовка компьютерного кода*, включающего в себя детали процесса симуляции (сила ветровой нагрузки, гравитации, вес исходного элемента, материал, задание временных рамок процесса симуляции).

– *Запуск* процесса симуляции.

– *Остановка или повторная генерация* симуляции.

4.3. Самым ярким примером архитектурного объекта, олицетворяющего процесс симуляции, является здание Саграда Фамилия А. Гауди, который использовал вышеприведённый алгоритм задолго до появления компьютеров. Антонио Гауди путём подвешивания грузиков на цепях получил в результате абрис купола собора наиболее оптимальной геометрии с точки зрения работы конструкции.

4.4. Внедрение метода симуляций в процесс архитектурного формообразования даёт неоценимый результат в плане генерации оптимизированных форм, улучшенных прочностных характеристик структуры, возможности непрерывного экспериментального формообразования. Использование метода симуляций дает возможность получить уникальную геометрию, обладающую новыми художественными характеристиками.

Кроме того, стоит рассмотреть этапы аналитики и разработки архитектурной концепции. Структурирование и оценка цифровых методов на стадии анализа исходных данных и создания концепции архитектурного проекта имеет большое значение. В большинстве случаев аналитическая часть проектирования включает градостроительный анализ и поиск различных архитектурных решений определенной типологии здания. Для этапа сбора данных и аналитики, можно выделить следующие цифровые инструменты анализа:

1. Хронотоп – платформа компании Habidatum для анализа городских данных, которая отслеживает информацию в режиме реального времени и с традиционным ретроспективным анализом временных рядов.

2. База данных на различных интернет-ресурсах. Архитектору-аналитику доступно большое количество информации для поиска данных, включая государственные порталы, архитектурные сайты, онлайн карты и т.д.

Процесс поиска архитектурной формы продолжается на стадии создания первичных чертежей. На этом этапе используются различные виды цифрового моделирования:

- генерация архитектурной формы на основе климатических и геологических особенностей участка проектирования (рис. 2);
- генерация архитектурной формы на основе заданных правил и эволюционных алгоритмов;
- формирование архитектурного объема путём внедрения физических симуляций;
- первичная конструктивная оптимизация разработанной архитектурной формы;
- алгоритмизация и параметризация [1] геометрии, разработанной архитектором.

Таким образом, поиск формы может сопровождаться любым из вышеперечисленных способов или их комбинации.

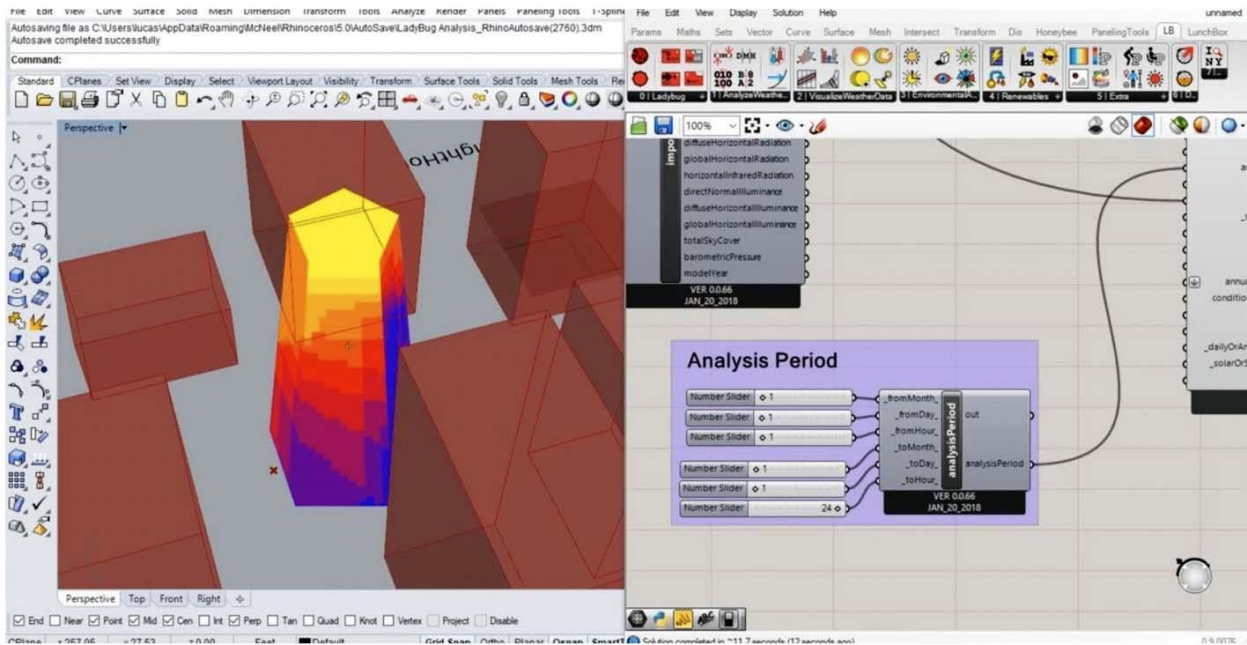


Рис. 2. Генерация архитектурной формы на основе климатических и геологических особенностей участка проектирования, интерфейс программы Grasshopper

На этапе выпуска проектной документации происходит детализация проекта, в связи с этим необходимо оценить потенциал цифровых методов, позволяющих работать с проектной и рабочей документацией. Можно выделить несколько групп алгоритмических инструментов.

Проектная документация:

- создание BIM модели здания;
- вторая итерация анализа инсоляции, акустики, конструктивных характеристик здания;
- алгоритмическое моделирование элементов здания (деталей фасада).

Рабочая документация:

- алгоритмическое моделирование и генерация деталей фасада и интерьера (раскладка плитки);
- финальный анализ общего конструктива здания и внутренних элементов;
- оптимизация рутинного процесса разработки рабочей документации, автоматизация примитивных проектных работ, моделирование сложных элементов фасада (рис. 3).



Рис. 3. Алгоритмическое моделирование элементов здания (деталей фасада), Отель Морфейус, Zaha Hadid Architects, Китай, 2018

Приведённый выше анализ позволяет с уверенностью утверждать, что внедрение цифровых методов на этапе разработки рабочей и проектной документации помогает экономить время за счёт создания гибкой и автоматизированной архитектурной модели здания [2].

На стадии строительства и цифрового производства происходит выпуск рабочей документации и процесс физического воплощения архитектурной модели. Это особенно важный этап, если речь идёт о сложной форме и уникальной геометрии деталей.

Сегодня типовая серийная застройка основана на массовом выпуске типовых элементов конструкции (блоки стен, перекрытий, окон, дверей), тогда как современные строительные технологии позволяют выпускать уникальные детали, а производство таких элементов не превышает стоимость выпуска элементов массового (конвейерного) производства. При создании детализированной геометрии здания в среде компьютерных программ можно получать чертежи любых уникальных деталей (рис. 4), готовых для реализации в процессе цифрового производства.

Программа Rhinoceros + Grasshopper позволяет осуществлять такой процесс производства. Цифровая модель проходит подготовку к процессу производств- проверку на наличие пустот и на правильность моделирования геометрии [3]. Существует большое количество различных инструментов, способных перенести геометрию из компьютерной среды в физическую: роботизированное производство, 3D печать, станки с ЧПУ и другие.

Помимо создания объемов, необходимо помнить о физических симуляциях и экспериментах, позволяющих на моделях уменьшенного масштаба или на деталях увидеть работу элемента и конструкции в целом и определить релевантность и способность структуры к дальнейшей эксплуатации [4]. Цифровые и физические тесты по сравнению с традиционными методами позволяют уточнить результаты и выявить значительные отличия в оценке конструктивного потенциала формы.

Развитие современной отечественной архитектуры влечет за собой активное внедрение прогрессивного инструментария [5]. Российские архитекторы применяют как параметрические, так и генеративные методы. В качестве примера можно рассмотреть практику архитектурного бюро Nowadays Office. При проектировании Музея Московского Кремля были использованы вычислительные инструменты в процессе моделирования сложной геометрии сводов (рис. 4), фасадов и раскладки плитки на поверхности двоякой кривизны. Такой подход помог сэкономить большое количество времени. Параметрическая модель облегчила процесс проектирования при дальнейших корректировках геометрии всего здания и отдельных помещений.



Рис. 4. Своды музея Московского Кремля (раскладка плитки), Nowadays Office, 2020

Заслуживает внимания опыт российского бюро «Новое», в частности проекты павильонов EXPO-2017 Astana. Создание параметрической модели [6] также привело к экономии времени на проектирование и автоматизированному выводу чертежей.

Кроме того, можно отметить деятельность консалтинговой компании Simplex Noise, которая, в отличие от других отечественных бюро, специализирующихся на одном из методов цифрового моделирования, использует все виды вычислительного проектирования. Способ работы Simplex Noise зависит от конкретных проектных задач: инструменты могут применяться локально на отдельных стадиях проектирования или создаётся единая вычислительная модель, которая объединяет в себе несколько этапов – от аналитики до вывода на производство.

Еще одним примером отечественного архитектурного бюро является SA Lab (Smart Architecture Laboratory), которое занимается непосредственным внедрением прогрессивных технологий в архитектурную деятельность. Инструменты вычислительного проектирования затрагивают почти все проектные задачи: сбор исходных данных, аналитика, разработка концепций, формообразование, выпуск рабочей документации и подготовка файлов к цифровому производству. Например, при разработке формы частного дома Near the Forest архитекторы использовали генеративные методы проектирования – эволюционные алгоритмы Galapagos (компонент плагина Grasshopper,

программы Rhinoceros) в связке с программой Ecotect. Данный инструментарий был применён для поиска оптимальной геометрии здания с учетом множества параметров: радиус кривизны, габариты, конфигурация формы, положение на участке, угол наклона кровли и ориентация относительно солнца.

Вышеприведённый анализ опыта отечественных проектных бюро говорит о том, что сегодня в России в основном получило распространение параметрическое моделирование, при этом, генеративные методы проектирования пользуются всё большей популярностью. Рассматривая цифровые инструменты как новый метод архитектурного творчества, архитектурные бюро используют вычислительное проектирование в качестве инструмента, оптимизирующего проектный процесс, как в плане сокращения временных затрат на выполнение определенных рутинных процессов (например, раскладка плитки), так и в качестве моделирования сложной геометрии.

В заключение проведённого исследования важно подчеркнуть, что создание цифровой архитектуры подразумевает возможность реализации архитектурной идеи двумя методами, использующими компьютерные технологии. В одном случае моделирование происходит в цифровой среде с привлечением средств компьютерных генераций, но финальные композиционные решения остаются за архитектором. Во втором случае формообразование исходит из условий и параметров, заданных человеком. Сравнение этих методов наталкивает на философские размышления о будущем архитектурного формообразования без доминирующего участия человека. Выполненный анализ инструментов генеративного моделирования позволяет оценить релевантность применения компьютерных кодов и правильность получаемых результатов.

Источники иллюстраций

Рис. 1. – Иллюстрация, разработанная автором статьи Салех М.С.

Рис. 2. – URL: <https://www.youtube.com/watch?v=YC-rLrs6IE8> (дата обращения 23.10.20).

Рис. 3. – URL: <https://medium.com/design-manifestos/design-manifestos-alan-tai-of-front-inc-203c6d18d9cc> (дата обращения 23.07.20).

Рис. 4. – URL: <https://softculture.cc/blog/special-projects/sc-labs/tsifrovye-metody-v-praktike-rossijskih-byuro> (дата обращения 23.07.20).

Литература

1. Сапрыкина Н.А. Тезаурус параметрической парадигмы формирования архитектурного пространства // *Architecture and Modern Information Technologies*. – 2017. – №3(40). – С. 281–303. – URL: http://marhi.ru/AMIT/2017/3kvart17/21_saprykina/index.php (дата обращения 23.07.20).
2. Липкин С.М. Оптимизация расположения датчиков в сенсорной сети на основе генетического алгоритма / С.М. Липкин, Е.С. Михалин, В.Д. Губий, А.Г. Чипко // *Успехи современной науки и образования*. – Том 5. – №2. – 2017. – С. 78–81. – URL: http://modernsciencejournal.org/release/2017/USNO_2017_2_5_tom.pdf (дата обращения 23.07.20).
3. Coenen T.H. *Introduction to algorithms*. – Massachusetts: The MIT Press, 2001. – P. 67–75.
4. El-Khalidi M. *Mapping Boundaries of Generative Systems for Design 14 Synthesis*. MSc thesis. – Boston: Massachusetts Institute of Technology, MA, 2007. – P. 68–71.
5. Hensel M., Menges A., Weistock M. *Emergent technologies and design: Towards a biological paradigm for architecture*. – Tehran: Tehran University Press, 2010. – P. 90–129.

6. Khabazi Z. Algorithmic architecture paradigm, first edition // European Online Journal of Natural and Social Sciences. – Tehran: Ketabkadeh Publication, 2015. – Vol.3. – № 3 Digital architecture, first edition. – P. 508–516.
7. Rozvany G. Aims, scope, methods, history, and unified terminology of computer-aided topological optimization in structural mechanics. – Prague: Struct Multidisc Optim, 2009. – P. 19.

References

1. Saprykina N. Thesaurus of Parametric Paradigm for Architectural Space Forming. Architecture and Modern Information Technologies, 2017, no. 3(40), pp. 281–303. Available at: http://marhi.ru/eng/AMIT/2017/3kvart17/21_saprykina/index.php
2. Lipkin S.M., Mikhalin E.S., Gubiy V.D., Chipko A.G. *Optimizaciya paspolozheniya datchikov v sensornoi seti na osnove geneticheskogo algoritma* [Optimization of the location of sensors in the sensor network based on the genetic algorithm. Achievements of modern science and education]. Volume 5, no. 2, 2017, pp. 78–81. Available at: http://modernsciencejournal.org/release/2017/USNO_2017_2_5_tom.pdf
3. Coemen T.H. Introduction to algorithms. Massachusetts. The MIT Press, 2001, pp. 67–75.
4. El-Khaldi M. Mapping Boundaries of Generative Systems for Design 14 Synthesis. MSc thesis. Massachusetts Institute of Technology, Boston, MA, 2007, pp. 68–71.
5. Hensel M., Menges A., Weistock M. Emergent technologies and design: Towards a biological paradigm for architecture. Tehran, Tehran University Press, 2010, pp. 90–129.
6. Khabazi Z. Algorithmic architecture paradigm, first edition. Tehran, Ketabkadeh Publication. European Online Journal of Natural and Social Sciences 2015. Vol. 3, no.3 Digital architecture, first edition, pp. 508–516.
7. Rozvany G. Aims, scope, methods, history, and unified terminology of computer-aided topological optimization in structural mechanics. Prague: Struct Multidisc Optim, 2009, p. 19.

ОБ АВТОРЕ

Салех Мария Сальвановна

Аспирант, кафедра «Основы архитектурного проектирования», Московский архитектурный институт (государственная академия), Москва, Россия
e-mail: ey_marisha33@yahoo.com

ABOUT THE AUTHOR

Saleh Maria

Postgraduate Student, Chair «Foundation of Architectural Design», Moscow Institute of Architecture (State Academy), Moscow, Russia
e-mail: ey_marisha33@yahoo.com