

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
МОСКОВСКИЙ АРХИТЕКТУРНЫЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ)

На правах рукописи



САЛЕХ Мария Сальвановна

**МЕТОДЫ АРХИТЕКТУРНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ НА ОСНОВЕ
ГЕНЕРАТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность:

2.1.11 – Теория и история архитектуры,
реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата архитектуры

ТОМ I

Научный руководитель:
доктор архитектуры, профессор
Сапрыкина Наталия Алексеевна

Москва – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АРХИТЕКТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РАЗРАБОТОК НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ МЕТОДОВ	14
1.1. Терминологический ряд основных направлений цифровых методов.....	14
1.1.1. Параметрическое проектирование.....	14
1.1.2. Генеративное моделирование. Генетические алгоритмы. Оптимизации. Агентные системы.....	17
1.1.3. Биомиметика.....	20
1.1.4. Искусственный интеллект. Компьютерное зрение.....	22
1.1.5. База данных. Интернет вещей.....	28
1.1.6. Цифровое производство.....	30
1.1.7. Глоссарий основных терминов цифрового моделирования в контексте архитектуры.....	32
1.2. Основные исторические прецеденты развития генеративных подходов.....	35
1.2.1. Прототипы цифровой архитектуры.....	35
1.2.2. Творческие методы поиска формы А. Гауди, основанные на применении физических симуляций.....	36
1.2.3. Изучение методов поиска формы архитектора и ученого Ф. Отто.....	37
на основе экспериментального подхода.....	37
1.2.4. Основные принципы формообразования геодезических куполов Б. Фуллера.....	41
1.2.5. Методы поиска формы с учетом различных параметров криволинейной геометрии архитекторов Л. Моретти и Ф. Кислера.....	42
1.2.6. Основные принципы формообразования С. Прайса и его влияние на современные роботизированные эксперименты в архитектуре.....	45
1.3. Мировой опыт внедрения цифровых методов в архитектуру в XX–XXI веке.....	48
1.3.1. Внедрение компьютерных методов в работах архитектора Ф. Гэри.....	48
1.3.2. Творческий метод З. Хадид и его влияние на прогрессивные разработки современных методов моделирования.....	48
1.3.3. Применение компьютерных методов для поиска новых архитектурных форм в работе Т. Ито и А. Исодзаки.....	50
1.3.4. Внедрение компьютерных методов в работе и особенности.....	52
процесса формообразования Г. Линн.....	52
1.3.5. Особенности архитектуры и вдохновляющих факторов бюро MAD Architects.....	55
1.3.6. Инновационные методы в работе бюро Kokkugia.....	56
1.3.7. Особенности применения пескопечати в архитектуре.....	57
и внедрение компьютерных методов в работе архитектора М. Хансмейера.....	57
1.3.8. Результаты внедрения методов топологических оптимизаций.....	

в работе компании Agur.....	60
1.3.9. Применение методов генеративного моделирования в работе бюро Softkill	62
1.3.10. Внедрение компьютерных методов в работе бюро ILEK	64
1.3.11. Создание 3D-печатной архитектуры в проекте DFAB House.....	73
1.3.12. Внедрение нейронных сетей в работе цифрового художника Р. Анадол	75
1.3.13. Отечественный опыт внедрения цифровых методов в архитектуру	76
Выводы по главе 1	79

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ФОРМИРОВАНИЯ АРХИТЕКТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ МЕТОДОВ И ТЕНДЕНЦИЯ ИХ РАЗВИТИЯ В XXI ВЕКЕ

81

2.1. Современные факторы и предпосылки развития цифровых методов в архитектуре	81
2.2. Социально-философские исследования в контексте формирования новой цифровой архитектуры.....	83
2.2.1. Современная философская картина мира	84
2.2.2. Характеристики информационно-сетевое общества.	85
Влияние социальных факторов на возникновение нового типа.....	85
архитектурного формообразования.....	85
2.2.3. Дифференциация определений цифровой архитектуры:	86
генеративное и параметрическое проектирование	86
2.2.4. Спекулятивно-материалистические и реалистические	87
направления современной философии.....	87
2.2.5. Принципы Квентина Мейясу в критике корреляционизма.....	88
2.2.6. Акторно-сетевая теория Бруно Латура.....	89
2.2.7. Перформативное содержание архитектуры.....	89
2.2.8. Влияние творческих методов Захи Хадид и социально-философских.....	89
исследований Патрика Шумахера на формирование	89
нового архитектурного стиля "параметризм".....	89
2.3. Направления развития и классификация цифровых методов	92
2.4. Внедрение цифровых методов на различных этапах	94
архитектурного проектирования	94
2.4.1. Аналитика и разработка архитектурной концепции.	94
2.4.2. Проектирование и разработка рабочей документации.....	95
2.4.3. Строительство, цифровое производство	96
Выводы по главе 2	97

ГЛАВА 3. МЕТОДЫ ГЕНЕРАТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОЕКТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ

99

3.1. Метод генетических алгоритмов генеративного моделирования.....	99
3.2 Метод топологических оптимизаций генеративного моделирования	101
3.3. Метод компьютерных симуляций генеративного моделирования.....	102

3.4. Метод агентных систем генеративного моделирования.....	103
Выводы по главе 3	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	119
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	130
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.....	141
ТОМ II. ПРИЛОЖЕНИЕ. Графические материалы	

ВВЕДЕНИЕ

Исследование посвящено поиску и анализу новых методов проектирования в контексте процесса архитектурного формообразования. В рамках исследования рассматриваются развивающиеся компьютерные технологии (генеративные методы, алгоритмизация процессов формообразования, кинетика, биомиметика, агентные системы, искусственный интеллект и т.д.). Существует большое количество традиционных архитектурных методов поиска формы, однако технологии постоянно развиваются, появляются новые инструменты, которые в совокупности могут уменьшить временные и экономические затраты.

Современные компьютерные технологии дают возможность генерировать большое количество вариантов, которые впоследствии можно оптимизировать исходя из конструктивных, экономических и социальных показателей. Некоторые современные цифровые методы являются эволюционным развитием традиционных методов поиска формы. Например, макетный метод можно сравнить с прототипированием, так как физическая модель может внести свои коррективы в форму с точки зрения устойчивости. Однако генетические алгоритмы, агентные системы и топологические оптимизации являются продуктом цифровой эпохи и мгновенно решают такие архитектурные проблемы, на решение которых человеку понадобится несколько лет [41]. Таким образом, современные архитектурные концепции невозможно представить без использования цифровых методов, а если архитектор игнорирует научно-технический прогресс, то автоматически создает архитектуру для предыдущего поколения, в силу того что потребности современного общества постоянно меняются и сроки на выполнение многих архитектурных задач максимально сжаты [123].

Актуальность темы

Тема исследования основана на проблеме архитектурного формообразования, которое, в свою очередь, всегда имело важное значение в процессе проектирования. Постоянное развитие информационных технологий и научно-технического прогресса приносит неисчерпаемые ресурсы создания новой классификации композиционных методов архитектурного формообразования (рис. 1).

Архитектура в совокупности с современными цифровыми технологиями влияет на возникновение нового типа архитектурного мышления как в контексте формообразования, так и в контексте проектирования [1]. На сегодняшний день архитектурный мир постоянно пополняется новыми инновационными инструментами и порожденными ими методами проектирования, однако до сих пор не было четкой классификации и структуризации появляющихся возможностей [6]. Актуально на ранних этапах возникновения цифровых методов создать иерархию всех инструментов и – что самое главное – понять, какой инструмент подходит для определенных задач. Также необходимо создать базу проведенных экспериментов и результатов на основе новейших методов. Актуальность темы, кроме всего прочего, заключается в выборе и оценке потенциала современных цифровых инструментов, возможном сравнении различных инструментов для решения одинаковых задач [2]. Также цифровые методы помогают генерировать такие архитектурные формы, которые не может спрогнозировать даже сам архитектор, задающий исходные данные (правила и ограничения) для работы программы.

Стоит отметить, что современное информационно-сетевое общество предъявляет иные требования к архитектурной среде и зданиям в целом – это включает создание гибридного, многофункционального, постоянно адаптирующегося пространства [3]. В соответствии с этим архитекторам необходимо использовать новые методы поиска формы, чтобы получить результат, удовлетворяющий потребности современных пользователей.

Основной концепцией создания архитектурных объектов на основе цифровых методов является постоянное развитие компьютерных инструментов. На данный момент существует большое количество программного обеспечения для реализации цифровых методов в контексте архитектуры [57]. Например, одним из самых популярных инструментов является программа Rhinoceros совместно с плагином Grasshopper (рис. 2). Данные инструменты в совокупности представляют собой язык визуального программирования, который наиболее понятен и удобен для архитектора, однако на более продвинутом этапе применения алгоритмов и скриптов архитекторы-программисты начинают использовать традиционные языки

программирования, как, например: Python, Java script, а для создания анимации на основе разработанного кода используется Processing. Таким образом, границы знания архитектора постепенно переходят в другие науки познания: программирование, биологию, социологию, философию и другие.

Следовательно, архитектурный объект включает в себя новые параметры и адаптирован с точки зрения смежных наук. В данном случае программирование помогает быстро и эффективно решить проектную задачу. Биология подстраивается под нужды природы и несет экологический контекст. Учет факторов из социологии и философии дает представление о картине мира и о том, какая архитектура нужна современному обществу для комфортного пребывания в ней. Таким образом, цифровые методы имеют точку отсчета, то есть входные данные, которые задает архитектор, заранее проанализировав участок проектирования и соответствующие факторы: климат, геологию и др. Кроме того, при разработке исходные данных для генерации и поиска формы, архитектор изучает техническое задание и выявляет наиболее важные условия, из чего складываются определенные правила и ограничения. Таким образом, формируется задание для программы, которая просчитывает и выдает наиболее оптимальные варианты.

Теоретическая база исследования и степень научной разработанности

Если подробно рассматривать архитектурную деятельность, то можно выявить большой спектр задач, которые решает архитектор: адаптация архитектуры под климат, движение потоков людей, рельеф местности, особенности участка проектирования и многое другое. Иногда архитекторы в силу некоторых обстоятельств не могут учесть все факторы. Однако вычислительная парадигма породила генеративные и параметрические методы, внедрение в архитектуру которых может дать результат, основанный на необходимых правилах. Многие современные архитекторы-программисты занимаются исследованиями цифровых методов в контексте архитектуры. В основном исследования начались после цифровой революции XX века.

Научно-технический прогресс вдохновляет архитекторов на постоянное развитие архитектурных методов и более быстрое решение сложных задач.

Основной пик внедрения программирования в архитектуру пришелся на 80–90-е годы XX века. Одним из первых исследователей был Седрик Прайс, который относился к архитектуре как к механизму. Затем Френк Гэри создавал сложные архитектурные формы, которые было бы невозможно воплотить в жизнь без соответствующего программного обеспечения Gery Technologies: в основу данного программного продукта легли вычислительные инструменты, которые использовали при расчете самолетов.

Последствия цифровой революции стали основой для компьютерных экспериментов, например, ученый Рейнольдс наблюдал и изучал движение птиц, а затем алгоритмизировал их поведение на компьютере. Начало XXI века характеризуется появлением большого количества сложных деконструктивистских архитектурных объектов (таких архитекторов, как Заха Хадид, Тойо Ито, Грег Линн и др.). Таким образом, ускорился процесс адаптации цифровых методов для расчета сословных архитектурных объектов. Кроме того, появилось большое количество исследовательских программ в таких институтах, как АА, МИТ, IaaC, где ученые-архитекторы исследовали как технологическую часть вопроса применения цифровых инструментов, так и творческую (поиск формы).

Одним из ярких исследователей цифровых методов является Архим Менгес: его исследования основаны на изучении кинетической архитектуры, внедрении принципов природных процессов на архитектуру, материалы и применение их свойств в архитектуре, а также адаптация архитектурных объектов под существующий контекст. Вышеперечисленные исследования были бы невозможны без использования соответствующего программного обеспечения. Кроме того, большой вклад в развитие цифровых методов внес Роланд Снукс, архитектор-исследователь из Массачусетского технологического института, темой исследования которого являются агентные системы (движение и самоорганизация природных объектов). Р. Снукс также занимается практической деятельностью, воплощая свои исследования в конкурсных проектах в рамках архитектурной практики бюро Kokkugia.

Стоит выделить работу бюро Zaha Hadid Architects, в частности П. Шумахера, который написал манифест параметризма, подробно описывая основные постулаты и правила данного направления.

Кроме того, существует большое количество архитекторов-программистов, которые для решения определенных задач создают свои собственные коды и программы. Таким архитектором является Алекс Фишер, исследования которого основаны на создании инструмента в среде Grasshopper, способного рассчитать инсоляцию и адаптировать геометрию здания под условия климата.

Отечественные исследователи в основном опираются на работы зарубежных ученых и практикующих архитекторов, так как строительство сложной архитектуры требует больших экономических затрат [11]. Вопросам изучения проявлений новых теорий и технологий в современном проектировании и новых «нелинейных» (дигитальных, компьютерных) форм в архитектуре посвящены труды: Е.В. Барчуговой, В.Э. Волынскова, И.А. Добрицыной, Н.В. Касьянова, Г.И. Ревзина, Н.А. Рочеговой, Э.В. Хаймана, В.А. Юзбашева, О.Г. Яцюка, и др.

Данное исследование базируется на теоретических положениях, изложенных в работах И.А. Азизяна, А.В. Иконникова, А.И. Каплуна, А.Г. Раппапорта, А.В. Рябушина, Н.А. Сапрыкиной, В.Л. Хайта, С.О. Хан-Магомедова, А.Н. Шукуровой. Наряду с общетеоретическими работами были использованы исследования, связанные с поиском «матриц проектного мышления» [33], «проектного языка», разработкой программ «автоматизированных средств проектирования объектов строительства» (АСПОС), «систем автоматизированного проектирования» (САПР), изложенные в трудах Л.Н. Авдотьина, Л.Д. Бронера, Э.П. Григорьева, А.Э. Гутнова, Е.П. Костогаровой, Н.Н. Ноткина, В.И. Ретинского, А.П. Рома, Д.Н. Яблонского.

Вышеперечисленные исследования говорят о важности выбранной темы, за постоянным развитием технологий следуют новые разработки цифровых инструментов и методов, которые внедряют для решения архитектурных задач. В связи с этим важно структурировать и классифицировать полученные о цифровых методах знания, понять перспективные направления данной темы и четко соотнести метод с задачей. Таким образом, станет понятно, какие сферы архитектурной

деятельности требуют своих инструментов и методов. Например, поиск архитектурной формы можно производить различными методами, но вопрос эстетики и композиции организации пространства остается открытым. Однако некоторые исследователи занимаются внедрением искусственного интеллекта, что в скором будущем научит компьютер мыслить подобно человеку, разбираясь в полученной архитектурной форме с точки зрения основ пространственной композиции.

Теоретическая значимость исследования выбранной темы заключается в разработке методов и классификаций приемов поиска архитектурной формы на основе генеративного моделирования.

Авторский вклад данного исследования заключается в формировании базы инструментов и методов цифрового моделирования и формообразования на основе мирового опыта использования цифровых методов в архитектурной практике и теории. Кроме того, автор выделяет некоторые аспекты (в рамках того или иного метода генеративного формообразования), которые может регулировать пользователь для достижения определенной архитектурной выразительности. Таким образом, архитектор не просто использует компьютерный код, а имеет “рычаги влияния” на конечный результат, исходя из своего композиционного восприятия формы.

Практическая значимость исследования подразумевает разработку нового типа архитектурных объектов на основе прогрессивных методов поиска формы.

Научная новизна исследования

Впервые классифицируются методы и приемы проектирования зданий на основе генеративного моделирования архитектурной формы.

Определены основные методы генеративного и параметрического моделирования архитектурных объектов. Разработаны алгоритмы работы с каждым из методов в рамках архитектурного проектирования.

Гипотеза исследования

Применение генеративных методов моделирования и проектирования влияет на решение архитектурных задач. Внедрение искусственного интеллекта изменит

компьютерный процесс формообразования, так как станет возможным научить компьютер распознавать композицию и пропорции архитектурной модели. Использование принципов природных процессов в генеративном моделировании сможет повлиять на бионику структуры архитектурного объекта.

Цель исследования

Целью исследования является систематизация и классификация генеративных методов поиска формы, изучение их эволюции и влияния на процесс формообразования.

Задачи исследования:

1. Анализ процесса поиска формы зарубежными и отечественными архитекторами, выявление традиционных и компьютерных методов поиска формы архитектурных объектов, разработанных при помощи генеративных методов.
2. Выявление основных направлений генеративного моделирования и его влияния на современное формообразование в архитектуре. Анализ системы искусственного интеллекта в рамках архитектурного проектирования.
3. Разработка методов поиска формы в зависимости от исходных параметров, проверка выявленных методов на экспериментальных моделях проектного моделирования.

Объектом исследования являются архитектурные объекты, создаваемые на основе генеративного формообразования.

Предметом исследования являются методы формообразования на основе инструментов генеративного моделирования.

Границы исследования

Временные рамки работы включают в себя исследования преобразов цифровых методов, затрагивая античный период, развитие вычислительного проектирования с середины XX века по настоящее время. В исследовании рассматривается проблема создания композиции архитектурного образа и эволюция развития цифровых методов. Отмечаются архитекторы, которые существенно повлияли на формирование определенного направления цифровых методов. Выделяются периоды пика научно-технического прогресса, анализируется их

влияние на развитие новых вычислительных методов, чтобы выявить время возникновения и предпосылки определенных методов.

В исследовании в основном рассмотрены работы зарубежных архитекторов, практикующих генеративные и параметрические методы. Исследование и проектирование с применением цифровых методов активно ведется в таких странах, как США, Англия, Австралия, Китай и Австрия. Выбор широкого спектра зарубежных стран аргументирован большим количеством реализованных проектов. Кроме того, в таких странах, как США и Англия, существуют исследовательские институты, которые занимаются изучением и внедрением цифровых технологий в архитектурную практику. Также рассмотрен отечественный опыт применения цифровых методов на примере некоторых московских архитектурных объектов.

Исследование основано на возможностях программ Rhinoceros + Grasshopper и Processing + iGeo.

Генеративные методы необходимо рассматривать в совокупности с параметрическими методами моделирования, так как граница между данными типами цифрового формообразования размывается. Границы объектов формообразования в основном включают в себя объемное проектирование, однако некоторые примеры использования генеративных методов моделирования включают в себя градостроительные или интерьерные масштабы, которые более наглядно показывают результат внедрения определенного метода.

Среди отечественных зодчих есть большое количество пользователей параметрических методов моделирования, однако генеративное моделирование в России применяется локально и редко некоторыми бюро (SA lab, Nowadays office), которые внедряют метод физических симуляций в процесс архитектурного анализа и проектирования.

Научные результаты, выносимые на защиту

- классификация основных методов параметрического и генеративного формообразования архитектурного проектирования;
- методы генеративного формообразования, апробированные в проектно-экспериментальных моделях, иллюстрирующих данный подход в архитектуре.

Методология и методы исследования

1. Сбор информации о традиционных и компьютерных методах формообразования современной архитектуры.

2. Обзор и изучение реализованных и нереализованных проектов, с применением методов генеративного моделирования с целью выявления приемов, наиболее подходящих для решения поставленной задачи.

3. Разработка методов и алгоритмов работы с генеративным моделированием в рамках архитектурного формообразования.

4. Разработка экспериментально-адаптивных моделей, характеризующих каждый из выявленных методов генеративного формообразования.

Степень достоверности и апробация результатов исследования

Участие с первоначальными результатами исследования в конференции “Открытый город” в 2017 году. Международная молодежная научная конференция «Прочность, ползучесть и разрушение строительных и машиностроительных материалов и конструкций». Материалы диссертации были изданы в сборниках тезисов и статей: «Наука, образование и экспериментальное проектирование», МАРХИ, 2018–2022 гг. Разработка программы для 5-го курса (бакалавр) дисциплины “Цифровые средства” в Российском университете дружбы народов, внедрение выводов исследования в проектный процесс студентов (рис. 138–141).

Объем и структура работы

Диссертация состоит из двух томов. Том 1 (144 страницы) включает введение, три главы, заключение с выводами исследования, список литературы (129 библиографических наименований). Том 2 (93 страницы) содержит графическое приложение (141 рисунок).

ГЛАВА 1.

ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АРХИТЕКТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РАЗРАБОТОК НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ МЕТОДОВ

Задачи главы – дать определение цифровым методам и терминологии, связанной с данным направлением; определить разницу между параметрическим и генеративным проектированием, рассмотреть термин «биомиметика» с точки зрения внедрения в архитектурное проектирование; изучить терминологию, связанную с искусственным интеллектом и компьютерным зрением.

Также основной задачей первой главы является определение предпосылок возникновения и эволюционного процесса цифровых методов, выявление прообразов вычислительных методов и их становление в период цифровой революции. Важным является определить практикующие архитектурные бюро XX–XXI века, которые внедряют цифровые методы в проектирование, не только получая уникальные результаты, но и экономя ресурсы. Первая глава посвящена проектам и реальным зданиям, спроектированным при помощи вычислительных компьютерных инструментов. Кроме того, представлены реализованные объекты, архитектурные и конструктивные решения которых было бы невозможно воплотить без применения алгоритмических и генеративных методов.

1.1. Терминологический ряд основных направлений цифровых методов

1.1.1. Параметрическое проектирование

Понятие «параметризм» [21] в контексте современной архитектуры означает, что морфология здания возникает при помощи анализа процессов, которые будут происходить внутри и снаружи [58]. Конструкция меняется, реагируя на свойства среды или новые функциональные требования. Архитектурная форма создается по заранее разработанной инструкции на основе большого объема входных данных, инструменты параметрического метода проектирования помогают повысить ее эффективность, происходит приспособление архитектуры к среде, в которой она предполагает быть.

Параметрические методы связаны с заданием условий и получением результата на основе входных данных. Ярким примером параметрических методов являются фасады, созданные аттракторами (рис. 3). Аттракторы представляют собой вариативность параметров формы на основе геометрической зависимости (рис. 4). Например, при создании параметрического фасада существует точка зависимости, где узор (паттерн) фасада реагирует на расстояние каждого элемента от точки зависимости, и посредством заданных правил узор фасада меняется при движении этой точки (рис. 5). Подобная манипуляция ярко демонстрируется на примере фасада с одинаковыми окнами (здания, расположенного в жарком климате), где точкой зависимости является солнце. Таким образом, параметры (габариты) окна, ориентированного на солнце, уменьшаются (чтобы здание не перегревалось), а размеры окна, находящегося в тени, остаются неизменными. Важно отметить, что от самого маленького до самого большого окна все габариты промежуточных окон меняются посредством пропорциональной градации от большого к малому.

В контексте параметризма можно отметить следующие направления: статичность и динамичность [12]. Под статичным видом параметрической архитектуры понимается использование методов с таким расчетом, чтобы здание при любых условиях контекста имело статичную форму, адаптированную под среду [15]. Динамический вид параметрической архитектуры подразумевает внедрение кинетических систем, которые реагируют на условия контекста в реальном времени, тем самым форма или оболочка здания постоянно меняются, адаптируясь под ситуацию.

При создании параметрического алгоритма необходимо продумать сценарий развития геометрии: от точки, линии, поверхности и до оболочки. Параметрические алгоритмы могут быть универсальными, особенно в контексте разработки различных вариантов фасадных решений [13].

Помимо параметрических методов, в контексте объемной архитектуры стоит отметить градостроительные возможности данного подхода. Примером внедрения параметрических методов в градостроительство может служить разработка застройки квартала с расчетом инсоляции, где высота объекта будет понижаться в

зависимости от расстояния до соседнего здания. Кроме всего прочего, композиция квартальной застройки должна быть композиционно соподчинена, то есть если самое высокое здание имеет определенную высоту, то соседнее здание должно пропорционально понижаться или быть такой же высоты.

Говоря о параметризме, стоит отметить, что вычислительная парадигма изменила процесс формообразования. Раньше, при модернистской архитектуре, отправной точкой для формообразования служили конструкции, тектоника и функция. В настоящее время цифровизация кардинально изменила процесс поиска формы, сделав основным инструментом архитектора программы, алгоритмизацию и сценарный метод формообразования. На данный момент архитекторы создают серии изменения формы и выбирают единственный объем из множества вариантов [95].

Алгоритмическое проектирование является одним из самых универсальных и удобных инструментов разработки архитектурной формы и решения архитектурных задач. При решении определенной задачи алгоритмы используют скрипты, основанные на математических закономерностях. Например, алгоритмы используют для расстановки парковочных мест, разработки фасадных систем, создания сложной изменяемой геометрии, разработки оболочек. Кроме того, геометрия, созданная с помощью алгоритмических методов, имеет зависимости элементов (рис. 6).

Важным при решении задачи методом алгоритмического моделирования является написание сценария: например, при создании оболочки нужно представить изначальные параметры: набор точек, которые расположены на равном расстоянии друг от друга; затем – формирование связей, кривых – направляющих, и соединение этих направляющих в оболочку. Необходимо учитывать, что при изменении любого изначального параметра формы (перемещение точки) меняется вся оболочка и ее направляющие, так как изначально были установлены зависимости [101]. Таким образом, можно в режиме реального времени изменять параметры, производя большое количество различных вариантов формы.

1.1.2. Генеративное моделирование. Генетические алгоритмы.

Оптимизации. Агентные системы

Генерация или генеративный метод в биологии – это совокупность особей одного биологического вида, появившихся на свет в одно время, поколение. Если проецировать этот термин на программирование, то под термином «генерация» подразумевают создание объекта на основе определенного алгоритма, который действует по заранее сформулированным законам. Такой подход активно применяют в компьютерном проектировании, что ведет за собой термин «генеративное моделирование». Генеративное моделирование – это процесс, при котором архитектор прописывает алгоритм того, что он хочет получить, задавая входные данные в качестве норм и правил, а в результате получает определенные решения, которые и являются генерацией (созданием) объекта. В свою очередь, генеративное моделирование является начальной фазой искусственного интеллекта, основным инструментом которого является машинное обучение [24]. Генеративная архитектура относится к начальной фазе применения искусственного интеллекта, то есть к разделу машинного обучения. В свою очередь машинное обучение – это система, которую необходимо обучить: загрузить большое количество информации и данных, после чего данная система может выдавать результаты в зависимости от поставленных задач.

Генеративная архитектура – это результат искусственного интеллекта, но на начальной стадии, когда основной контроль и вектор задает человек (архитектор). Однако существуют этапы архитектурного проектирования, где, помимо каких-то утилитарных задач, генеративное моделирование помогает создавать определенные варианты решений на основе вводных данных, но в конечном итоге финальный выбор результата зависит от человека и его художественного восприятия.

Под определением «генеративное моделирование» подразумевается, что элементы алгоритма реагируют на окружающие факторы и что все взаимосвязано, одно не может меняться без другого. Генеративные методы проектирования включают в себя генетические алгоритмы, топологические оптимизации, агентные системы. Основными инструментами генетических методов являются алгоритмы и

искусственный интеллект [44]. Основным отличием параметрических и генеративных методов является то, что генеративные методы могут выдать непредсказуемый результат, когда параметрические методы делают ровно то, что прописано в коде.

Генетические методы являются инструментом для решения различных задач на основе входных данных и эволюционных алгоритмов, которые основаны на теории естественного отбора, где выживает самая сильная особь [121]. Так происходит и с вариантами решения задач: из нескольких тысяч вариантов компьютер оставляет лишь самый оптимизированный с точки зрения удовлетворения всех требований исходных данных. Архитектор получает десять финальных вариантов, из которых он выбирает самый лучший, исходя из собственных эстетических предпочтений. Кроме того, что генетические алгоритмы дают широкий спектр решения задач, они предоставляют таблицы числовых значений определенных параметров (характеристик) выбора, а значит, можно в режиме реального времени проследить самый оптимизированный вариант из десяти выданных и понять разницу расхождений показателей, исходя из анализа (рис. 7). Это особенно актуально при сравнении технико-экономических показателей разных (полученных) моделей здания во время процесса поиска формы (рис. 8).

Оптимизации являются одной из разновидностей генеративных методов проектирования [103]. Самыми популярными и полезными для архитекторов являются топологические оптимизации, которые могут улучшить форму определенной модели, сделав ее экономичнее. Для этого необходимо загрузить в программу Rhinoceros модель, задать статические или динамические нагрузки и указать опоры закрепления (модели объекта) в среде плагина Grasshopper. После компонент Millerpede рассчитает полученную модель и на выходе даст оптимизированный вариант, где будет отсутствовать лишний материал, который не используется в работе (рис. 9). Как видим, топологические оптимизации могут повлиять на конечный итог формообразования и на экономические затраты материалов [4].

Симуляции также являются важным методом из серии генеративных инструментов моделирования, так как с помощью симуляций можно провести

большое количество экспериментов, связанных с конструктивными особенностями создаваемой формы (рис. 10). Модель погружается в среду Rhinoceros и Grasshopper, после чего применяются компоненты симуляции, которые могут провести такие симуляции, как имитация ветра, осадков, расчет реверберации, гравитации, симуляции скручивания, изгиба и многое другое [7]. Таким образом можно проверить, как форма будет реагировать на различные динамические и статические нагрузки. Кроме того, симуляции дают возможность делать первичную проверку прочности конструкции – например, если применить компонент Karamba, который может показать деформации и слабые места конструкции [76].

Агентные системы являются воплощением организации движения частиц в определенном направлении (рис. 11). У каждого агента есть цель и алгоритм поведения, вкуче все действия представляют собой полноценную самоорганизацию (рис. 12). Примером агентных систем в природе может быть движение стаи скворцов. В данном примере каждая птица соблюдает следующие алгоритмы: 1) держаться на некотором расстоянии от соседней птицы; 2) соблюдать общую скорость движения; 3) придерживаться направления движения.

Таким образом, основные виды агентных систем были заимствованы из природных организмов, которые имеют потребность в самоорганизации (птицы, термиты, рыбы, пчелы, рост микробов, движение частиц и т.д.) (рис. 13). Можно отметить два направления агентных систем, применяемых в архитектуре: роевой интеллект и стигмергия [123], где роевой интеллект подразумевает заимствование из среды развития микробов, а стигмергия основана на самоорганизации термитов и их реакции на внешние раздражители. Агентные системы полезны с точки зрения архитектурного формообразования тем, что можно задать алгоритм поведения агентов, чтобы они образовали такую геометрию, которая бы удовлетворяла нашим потребностям. В данном случае можно привести в пример эксперимент японских ученых, во время которого исследовался микроб *Pesyhaderema*, помещенный в стеклянный лабиринт, где находились кусочки пищи, и через несколько часов микроб нашел кратчайший путь от своего местоположения до еды. Таким образом, данный эксперимент переносят на проблемы градостроительства, чтобы найти

минимальные пути доступа от одного города до другого с учетом топографии. Говоря об объемной архитектуре, нужно отметить применение агентных систем в качестве инструмента формообразования, который дает возможность задавать точки роста объекта (начало возведения здания), зоны препятствий (границы участка), после чего формируются точки притяжения и сосредоточения, которые образуют структуру (скелет) здания.

Таким образом, следует подчеркнуть, что генеративные методы дают широкий спектр возможностей для архитектурного проектирования. Результаты формообразования будут отличаться при использовании различных методов, так как все методы основаны на разнообразных природных процессах.

1.1.3. Биомиметика

Биомиметика (биомимикрия) – это прикладная наука, которая черпает вдохновение для решения человеческих проблем посредством изучения естественных конструкций, систем и процессов (рис. 14). Изучив природные процессы более детально, можно извлечь своевременные решения и изучить новые направления для воплощения в архитектуре. Актуальной проблемой является разработка нового программного обеспечения для проектирования, позволяющего писать сценарии и коды, которые при соединении с моделированием динамических конструктивных и средовых нагрузок могут расширить процессы проектирования от разработки и изготовления единичного статичного здания или элементов различных форм, которые могут соответствовать любым условиям. Процессы проектирования и производства, основанные на вычислениях, позволяют изготавливать сложные формы и материалы практически всех продуктов, которые мы используем в нашей повседневной жизни: сложные объемы многих современных зданий и сложные типологии инфраструктурных и информационных сетей. Перспективным развитием являются попытки связать две новые науки: биомимикрию и компьютерное (вычислительное) проектирование – для изучения потенциала в разработке более устойчивой архитектуры. Исходя из проведенных

исследований, можно выделить основные направления биомиметики в контексте архитектуры [15]:

1. Адаптация является эволюционным процессом, где определенная популяция лучше расположена в своей среде обитания. Процесс адаптации неотъемлемо связан с мутацией организмов и стоит наравне с естественным отбором. Данные характеристики можно спроецировать на адаптивную архитектуру, которая путем приспособления к условиям окружающей среды становится более устойчивой.

2. Материал как система

Важным является изучение природных материалов и их реакций на внешние воздействия, что также применимо в архитектурных поисках (рис. 15).

3. Эволюционные процессы

Эволюция выбирает наиболее сильную популяцию – такой подход отражается в применении генетических алгоритмов при поиске архитектурной формы.

4. Выявление природных методов для решения архитектурных задач.

5. Форма и ее поведение в среде доказывают связь определенной формы и условий, в которых эта форма будет существовать.

Архитектура и биология на первый взгляд не кажутся такими разными: они основаны как на материальном, так и на организационном уровне, обе связаны с морфологией и структурой. Последние биотеории сложных адаптивных систем, и особенно явления возникновения, начали открывать область, которую архитектуре следует заимствовать, так как это будет иметь важное значение с точки зрения экоустойчивости. Подлинный биомиметический подход к архитектурному проектированию требует разработки новых методов проектирования, которые объединяют как моделирование поведения, так и ограничения процессов материализации в дополнение к факторам окружающей среды и их влияния на архитектуру. Это требует понимания формы, материала и структуры не как отдельных элементов, а скорее, как сложных взаимосвязей, которые встроены и исследуются в ходе интегральных вычислительных процессов проектирования. Если соединить морфогенез и экологию, то можно создать новую структуру,

разработанную для архитектурного проектирования, которая прочно укоренена в биологической парадигме. Данное морфо-экологическое направление нацелено на более целостный подход к проектированию, чтобы соотнести объект, окружающую среду и субъект в синергетическую динамическую связь.

Процесс проектирования природы использует ряд систем обратной связи, которые направляют рост и формирование организма на основе внутренних и внешних факторов, действующих на него. Все системы постоянно обновляются и действуют согласованно друг с другом, обеспечивая оптимальную функциональность на всех уровнях развития. Если это применяется к архитектуре, то становится возможным разрабатывать здания, которые тесно связаны с окружающей средой и подвержены ее влиянию, а также гораздо более развиты в плане экологического и устойчивого подхода (рис. 16).

1.1.4. Искусственный интеллект. Компьютерное зрение

Машинное обучение и искусственный интеллект являются воплощением большого набора библиотек, состоящих из алгоритмов, которые впоследствии обучают компьютер решать определенные задачи [105]. Машинное обучение уже проникло почти во все области человеческой деятельности. Данные инструменты берут на себя как рутинные задачи, так и более сложные, на которые у человека уйдет намного больше времени. Искусственный интеллект в архитектурном проектировании является одним из наиболее многообещающих направлений исследования, так как данный инструмент постоянно развивается и модернизируется. Постепенное внедрение BIM (Информационная модель здания) (рис. 17) ведет к адаптации архитектурного проектирования, к новым реалиям и потребностям. Таким образом, для решения архитектурных задач можно выделить простые алгоритмы, которые прописаны архитектором на основе ввода исходных данных и процесса получения результата (решения задач технического плана), и сложные алгоритмы искусственного интеллекта, которые могут решить творческие задачи архитектора. Основным инструментом создания алгоритмов искусственного интеллекта являются такие языки программирования, как C++, Python, которые, в

отличие от привычных архитектору визуальных языков программирования, дают более гибкую и свободную систему работы со скриптом (кодом).

Современные архитекторы часто используют прогрессивные вычислительные системы для создания сложных форм, а также в качестве средства контроля и создания большого количества вариантов формы. Однако большинство доступных на данный момент цифровых инструментов архитектора ограничены определенными командами. Узкий набор инструментов противостоит комплексному архитектурному видению, что заставляет архитекторов создавать собственные алгоритмы, основанные на исследованиях в смежных областях. Большинство из них базируются на иерархическом и почти линейном процессе разработки проекта. Тем не менее всё больше внимания уделяется привнесению в сторону новых методов проектирования эвристического подхода. В силу изменений в процессе разработки архитектуры можно создавать форму и архитектурное видение неиерархическим образом с существенно другим подходом к решению проблем.

Обычно этот подход основан на спрогнозированных предположениях. Тем не менее форма, созданная неиерархическим образом, может основываться на компьютерном процессе обучения, развивая искусственный интеллект. Изменения видны в современном подходе к созданию формы. Архитекторы создают свою структуру на основе предоставленных входных данных, которые могут быть собраны традиционным не вычислительным способом или с использованием передовых автоматизированных вычислительных систем, что основано на их субъективном, личном художественном видении. Алгоритмические методы привели к формированию процесса создания формы, который полностью адаптивен во всех проектных этапах. Важно отметить, что все алгоритмы и методы должны быть проверены архитектором, который отвечает за актуальную, полномасштабную архитектурную форму и опирается на свой опыт и предпочтения.

Среди многих определений, в зависимости от обсуждаемой области исследований, искусственный интеллект обычно описывается как метод «достижения сложных целей в комплексе».

При использовании нейронных сетей в контексте архитектурного проектирования или анализа определенных параметров чаще всего применяют сверточные нейронные сети, которые могут распознавать информацию и учиться посредством изображений, в частности анализируя пиксели [100]. Например, компьютер может распознать конкретное животное на картинке, так как пиксели в сумме дают возможность определить характерные признаки определенного животного. Машинное обучение как раз и заключается в том, что программисты прописывают характерные признаки (например, живых организмов) в коде – следовательно, компьютер их обрабатывает и запоминает, затем выдает результат по распознаванию объекта. Таким образом, данная технология дает широкий спектр для визуального восприятия архитектурных элементов и объемов в целом. Например, можно распознавать постройки различных архитекторов и проводить композиционный анализ посредством компьютерного зрения. В программировании нейронных сетей изучение и применение компьютерного зрения является одним из наиболее перспективных направлений. Компьютерное зрение дает машине возможность решать творческие задачи, воспринимая мир глазами человека [118].

Стоит отметить, что искусственный интеллект является системой, выполняющей технические задачи, которые обычно выполняет человек. Данный инструмент является процессом, умением обрабатывать и анализировать большое количество данных. Основная цель искусственного интеллекта заключается в расширении границ человеческих способностей. В свою очередь, машинное обучение ориентировано на создание систем, которые обучаются и развиваются путем обработки и анализа данных.

Историю искусственного интеллекта обычно связывают с именем Марвина Мински, который являлся организатором семинара в Дартмут-колледже в 1956 году, где группа исследователей разработала гипотезу о том, что все когнитивные функции, как-то: мышление, обучение, восприятие, расчет, память, даже научное открытие и художественное творчество – могут быть описаны с точностью, достаточной для того, чтобы запрограммировать компьютер на эти действия и воспроизвести их. На данный момент эту гипотезу не опровергли и не доказали.

Примеры применения искусственного интеллекта в искусстве и архитектуре

Художник-архитектор Рафик Анадол создает искусство (картины-перформансы) при помощи искусственного интеллекта. Р. Анадол является медиахудожником, режиссером и пионером эстетики искусственного интеллекта. Основная часть его работ посвящена проблемам и возможностям, вдохновленным компьютерными технологиями, а также тому, что значит быть человеком в эпоху искусственного интеллекта. Р. Анадол исследует то, как цифровая эпоха и машинный интеллект позволяют использовать новую эстетическую технику для создания обогащенной иммерсивной среды, обеспечивающей динамическое восприятие пространства. Трехмерные скульптуры и картины Р. Анадола для конкретных мест, живые аудиовизуальные перформансы и иммерсивные инсталляции принимают различные виртуальные и физические формы.

Кроме того, искусственный интеллект может создавать музыкальные произведения, которые впоследствии исполняют знаменитые музыканты. В 2020 году компанией OpenAI был выпущен Jukebox – это нейросеть, которая может создавать (генерировать) музыку в различных жанрах. Jukebox имитирует элементарный голос и музыкальные инструменты.

Влияние искусственного интеллекта на архитектуру

Архитектура является наиболее «медленным» видом искусства с точки зрения внедрения новых технологий по сравнению с (цифровой) живописью, музыкой и скульптурой. В архитектуре задействовано много факторов (климат, потоки людей, рельеф, художественный замысел), которые необходимо учесть для создания качественного объекта. Даже если представить, что искусственный интеллект может решать утилитарные задачи, то что можно сказать о творческом и художественном потенциале искусственного интеллекта? Отвечая на данный вопрос, стоит отметить, что искусственный интеллект был создан для решения творческих задач, поэтому существует определенный вектор развития, который постепенно раскрывает новые возможности данного инструмента. Например, существуют определенные алгоритмы искусственного интеллекта, которые могут выдавать архитектурные

образы (формат растра – 2D-изображения), созданные на основе яркого художественного языка определенного знаменитого архитектора (например, Захи Хадид), параллельно совмещая это с природными ландшафтами (изображения пустынных дюн, рек или гор). Таким образом, искусственный интеллект создает некий архитектурный образ, который одновременно отвечает эстетике определенного архитектора (Захи Хадид), а за основу геометрии берет природные холмы. Очевидно, что это лишь начало в формировании архитектурного художественного подхода у искусственного интеллекта, так как творческий процесс неотделим от человеческих знаний, логики и чувств.

Взаимосвязь творчества и искусственного интеллекта

Искусственный интеллект способен творить, но не может чувствовать вдохновение, иметь эвристические познания и делать открытия. Исходя из приведенного примера, стоит отметить: для того, чтобы получить художественное восприятие от искусственного интеллекта на уровне человека, необходимо осознать всю процедуру работы человеческого мозга в процессе творчества. Первый этап развития технологий искусственного интеллекта – это его обучение, как и в случае человека (ребенка): необходимо показать компьютеру (загрузить в алгоритм) всю историю развития искусства и архитектуры (через изображения), затем поставить задачу перед компьютером, сформировать внутренние выводы и создать базу знаний на основе этой информации. Например, если мы загружаем в алгоритмы искусственного интеллекта один миллион картинок барочных фасадов, то в результате искусственный интеллект может сделать выводы относительно некоторых фасадных элементов, которые отвечают за то, что данный стиль называется «барокко», а впоследствии отличить барокко от классицизма. А еще через определенное количество времени разработать свой барочный фасад, основанный на визуальном опыте и сделанных выводах. Такой процесс идентичен процессу освоения информации и выдачи результата человеком, за исключением факторов, касающихся чувств, эвристики, понимания гармонии и красоты (не просто на математическом уровне) и других факторов, которые свойственны только живому человеку.

Персональное мнение автора об искусственном интеллекте

Искусственный интеллект действительно является инструментом, при помощи которого можно проводить различные эксперименты с формой как в архитектурном, так и в художественном творчестве. Данные эксперименты должны проводиться под исключительным контролем человека, пока могут вдохновлять на какие-то эвристические импульсы со стороны архитектора. Творчество искусственного интеллекта постоянно развивается, но пока что в результатах данного инструмента есть только красивые картинки, основанные на специфическом языке определенных архитекторов, что, возможно, выглядит уникально, но лишено жизни, человеческой логики, чувств и философии. Таким образом, искусственный интеллект представляет собой полноценный инструмент, который в совокупности со знаниями и чувствами человека может дать уникальные и инновационные плоды.

Дальнейшее развития искусственного интеллекта в искусстве и архитектуре (3D-генерации)

Основной целью искусственного интеллекта является приближение его творческого потенциала к человеческому. Сейчас искусственный интеллект выдает плоскостной результат в формате растрового изображения, что усложняет восприятие архитектурных моделей, которые необходимо рассматривать в трехмерном объеме.

Искусственный интеллект в контексте архитектурного проектирования можно представить в трех фазах:

1) Утилитарная фаза – интеллект отлично выполняет утилитарные архитектурные задачи: расстановка колонн, вычерчивание парковочных мест, подсчет площадей и т.д.

2) Художественно-обучаемая фаза – искусственный интеллект может создавать картины, писать музыку на основе информации, которой он был обучен. Важно отметить, что картины, которые выдает искусственный интеллект, имеют совершенно искусственный (компьютерный) язык, но с точки зрения эстетики для человеческого глаза выглядят гармонично. Следовательно, искусственный

интеллект может делать “красивые” картинки, которые зачастую лишены человеческой логики, смысловой нагрузки и философского начала.

3) Абсолютно творческая фаза искусственного интеллекта. Данная фаза существует лишь на гипотетическом уровне. Если рассматривать искусственный интеллект как инструмент для создания качественного архитектурного образа (объекта) с нуля (с учетом правильного функционального зонирования, климатических характеристик и всех необходимых параметров, которые обычно человек закладывает в свою идею), то можно сказать, что на данном отрезке времени человек выигрывает и действительно создает такую архитектуру, которая удовлетворяет его потребности и имеет качественный эстетический образ. Искусственный интеллект может решать отдельные задачи, но, к сожалению, в нем отсутствует главное –эмоциональный интеллект, вдохновение и эвристический подход.

Следовательно, искусственный интеллект может нести функцию инструмента и помощника архитектора на различных стадиях архитектурного проектирования, тем самым экономя рабочее время, а сам архитектор будет контролировать, направлять методы искусственного интеллекта и на финальной стадии выбора эстетики образа здания будет руководствоваться своим эмоциональным интеллектом, знанием композиции, гармонии и пропорций.

Если представить, что искусственный интеллект может выполнять почти 70% всех задач, связанных с архитектурным формообразованием и проектированием, то сам архитектор выполняет 30% самой основополагающей работы, в которую входит формирование целостного образа архитектуры и внедрение эмоционального интеллекта архитектора.

1.1.5. База данных. Интернет вещей

Современный мир подразумевает коллекционирование и хранение большого количество данных, которые в основном поступают из интернета. Человек XXI века имеет активную виртуальную жизнь, которая характеризуется наличием различных

видов социальных сетей, где он общается, делится новостями, местоположением (геолокацией), фотографиями, мнением о событиях и вещах, совершает покупки, знакомится с новыми людьми, работает и учится (рис. 18). Таким образом, реальная жизнь постепенно подвергается массовой цифровизации и переносу в виртуальную реальность (рис. 19) [119].

С точки зрения цифровой архитектуры стоит отметить, что новые данные, полученные от человека через интернет, помогают создавать качественную архитектуру, исходя из цифровых требований и желаний общества. Однако самым важным при сборе данных BIG DATA и применении их в проектной деятельности является грамотный анализ и структуризация данных. Анализ формирует базу данных, в которой информация постоянно обновляется и дополняется, – такой подход уже помогает архитекторам создавать здания, удовлетворяющие потребности современного общества.

Важным является понимание того, как база данных влияет на архитектурную деятельность [98]. Во-первых, заказчики начинают просить архитекторов предоставить больше, чем просто наборы чертежей, а именно: BIM-данные (информационная трехмерная модель здания, включающая в себя детальную разработку проекта и чертежную документацию).

Во-вторых, заказчики запрашивают данные, полученные от зданий, так, чтобы каждый архитектурный элемент ассоциировался с технологией, управляемой данными. Такие данные позволяют владельцам зданий количественно измерять и улучшать производительность своих объектов [26]. Например, Walt Disney Co. сочетает отслеживание местоположения с данными о продажах и другими показателями взаимодействия с пользователем, чтобы оптимизировать производительность своих парков. Сертификационные организации по устойчивому строительству, такие как Совет по экологическому строительству США, уже предпринимают шаги для проверки эффективности здания с использованием фактических данных.

В-третьих, обилие данных может привести к созданию хранилищ данных и электронных таблиц COBie (таблица в среде BIM с информацией о каждом элементе

проекта). Например, использование BIM для проектирования и документирования здания потребовало совершенно нового набора бизнес-процессов.

1.1.6. Цифровое производство

Цифровое производство является одним из наиболее значимых аспектов прикладного применения вычислительных методов. Важно отметить, что воплощение цифрового объекта в реальность имеет важное значение для архитектурного понимания модели, будь то фрагмент фасада, инсталляция, скульптура или прототип, так как можно воочию увидеть и протестировать любой произведенный элемент, понять композицию, объем и то, как такой элемент организует пространство [25]. Существует большое количество техник прототипирования цифровой архитектуры, которые включают в себя применение 3D-принтера, ЧПУ-станка, лазерной резки, робототехники (многоосевые роборуки) (рис. 20, 21). Кроме того, для создания сложной цифровой архитектуры недостаточно применения традиционных методов возведения зданий – необходим цифровой подход, который как раз можно черпать из практики прототипирования [75]. Необходимо рассмотреть каждый вид цифрового производства отдельно и понять область применения каждого.

1. 3D-печать является одним из первых воплощений цифрового производства и применяется для создания макетов, однако уже строят здания и мосты при помощи данного инструмента (рис. 22). 3D-принтер представляет собой послойную трехмерную печать объема здания: как исходное данное берется 3D-модель и масштаб (если это не реальное здание, а макет).

2. Фрезерный станок с ЧПУ и лазерная резка являются самыми популярными инструментами прототипирования. Программа Grasshopper позволяет делать развертки любых форм. Развертки превращаются в раскладку уникальных элементов. Все части прототипа нумеруются по граням для того, чтобы правильно собрать заданный объем. Раскладка элементов подгружается в программу Corel DRAW и переносится на производство на станках. Таким образом, в начале XX века существовало штампованное производство (когда все элементы одинаковые), сейчас

же новые технологии лазерной и фрезерной резки дают возможность создавать уникальные элементы с похожими экономическими затратами [77]. Лазерный станок отличается от фрезерного тем, что лазер прорезает материал под углом 90 градусов, а фрезерный имеет несколько осей, что дает возможность создавать более уникальные объемы. Станки могут обработать большое количество различных материалов: бумагу, картон, древесину, металл, оргстекло.

3. Робототехника является олицетворением современной инженерной мысли, и именно при помощи таких технологий можно разрабатывать различные объемы, созданные в цифровой среде.

В частности, роботизированная рука является механической, программируемой рукой, одним из самых универсальных инструментов прототипирования и цифрового производства в контексте архитектуры, так как имеет свойства лазерного станка, 3D-печати. Работа данного инструмента заключается в том, что цифровая модель переносится в производство путем программирования роборуки, причем важным является определение габаритов прототипа и подбор подходящего инструмента (рис. 23). Кроме того, роботизированная рука имеет несколько осей, которые называются «степенями свободы», делая инструмент гибким и универсальным по сравнению с другими. Роботизированная рука обычно имеет функцию 4–7ми осевых оборотов, где их количество зависит от сложности выполняемой работы. Также инструмент поддается перепрофилированию. Существует большое количество насадок на роборуку: некоторые более свободно выполняют функцию ЧПУ-станка, иные выдавливают моментально застывающий материал на любую поверхность, являясь прообразом многофункционального 3D-принтера.

**1.1.7. Глоссарий основных терминов цифрового моделирования
в контексте архитектуры**

БИМ технологии	BIM — (Building Information Modeling или Building Information Model — информационное моделирование здания или информационная модель здания) — это цифровое представление физических и функциональных характеристик объекта, которое охватывает более чем просто геометрию здания
Биомиметика	имитация моделей, систем и элементов природы с целью решения сложных человеческих проблем
Бионика	прикладная наука о применении в технических устройствах и системах принципов организации, свойств, функций и структур живой природы, то есть форм живого в природе и их промышленных аналогах
Векторные поля	это отображение, которое каждой точке рассматриваемого пространства ставит в соответствие вектор с началом в этой точке. Например, вектор скорости ветра в данный момент времени различен в разных точках и может быть описан векторным полем
Визуальное программирование	способ создания программы для ЭВМ путём манипулирования графическими объектами вместо написания её текста
Генеративное моделирование	один из видов вычислительного проектирования, в котором роль архитектора заключается в создании систем скриптов и алгоритмов, позволяющих автоматизировано создавать проекты зданий по заранее созданному набору алгоритмов, в основе которых лежат принципы машинного обучения
Генетические алгоритмы (эволюционные алгоритмы)	это эвристический алгоритм поиска, используемый для решения задач оптимизации и моделирования путём случайного подбора, комбинирования и вариации искомым параметров с использованием механизмов, аналогичных естественному отбору в природе.
Геодезический купол	сферическое архитектурное сооружение, собранное из стержней, образующих геодезическую структуру, благодаря которой сооружение в целом обладает хорошими несущими качествами. Геодезический купол является несущей сетчатой оболочкой
Геометрия (Mesh)	совокупность вершин, рёбер и граней, которые определяют форму многогранного объекта в трёхмерной компьютерной графике и объёмном моделировании
Диаграмма Вороного	представляет такое разбиение плоскости, при котором каждая область этого разбиения образует множество точек, более близких к одному из элементов множества S, чем к любому другому элементу множества
Интернет вещей	концепция сети передачи данных между физическими объектами, оснащёнными встроенными средствами и технологиями для взаимодействия друг с другом или с внешней средой
Интерфейс программы	«проводник» между человеком и программой, операционной системой, техническим устройством или способ взаимодействия приложений между собой. Человек

	дает команды с помощью интерфейса, устройство их анализирует и отвечает.
Искусственный интеллект	свойство интеллектуальных систем выполнять творческие функции, которые традиционно считаются прерогативой человека; наука и технология создания интеллектуальных машин, особенно интеллектуальных компьютерных программ
Киберпространство	метафорическая абстракция, используемая в философии и в компьютерных технологиях и являющаяся виртуальной реальностью, — второй мир как «внутри» компьютеров, так и «внутри» компьютерных сетей.
Кинетическая архитектура	направление архитектуры, в котором здания сконструированы таким образом, что их части могут двигаться относительно друг друга, не нарушая общую целостность структуры. По-другому кинетическую архитектуру называют динамической, и относят к направлению архитектуры будущего
Компьютерное зрение	теория и технология создания машин, которые могут производить обнаружение, отслеживание и классификацию объектов.
Компьютерное моделирование	процесс вычисления компьютерной модели на одном или нескольких вычислительных узлах. Реализует представление объекта, системы, понятия в форме, отличной от реальной, но приближенной к алгоритмическому описанию.
Компьютерные симуляции	моделирование (создание, проектирование) учебных задач, ситуаций и их решение при помощи компьютера. Имитация физических симуляций в компьютерной среде для получения архитектурной формы.
Криволинейные поверхности (UV)	геометрические образы изучаются методами математического анализа. Главными объектами дифференциальной геометрии являются произвольные достаточно гладкие кривые (линии) и поверхности евклидова пространства, а также семейства линий и поверхностей
Машинное обучение	подраздел искусственного интеллекта (ИИ) и науки о данных, специализирующийся на использовании данных и алгоритмов для имитации процесса наработки опыта человеком с постепенным повышением точности.
Метасферы	n-мерный объект в компьютерной графике, представляющий собою замкнутую сглаженную поверхность
Общество 5.0 Информационно-сетевое общество	социально-экономическая и культурная стратегия развития общества, основанная на использовании цифровых технологий во всех сферах жизни
Объектно-ориентированная онтология	это философская позиция, согласно которой объекты существуют независимо от человеческого восприятия и

	ставят под сомнение центральную роль человеческого взгляда в традиционной философии
Параметрическое моделирование	разработка архитектурной формы с использованием параметров элементов модели и соотношений между этими параметрами. Параметризация позволяет за короткое время выдать различные варианты решений, основываясь на принципах алгоритмического ввода данных (точки, линии, поверхности).
Паттерн (узор)	схема-образ, действующая как посредствующее представление, или чувственное понятие, благодаря которому в режиме одновременности восприятия и мышления выявляются закономерности, как они существуют в природе и обществе
Перформативное искусство	форма современного искусства, жанр театрально-художественного представления, в которой произведения составляют действия художника или группы в определённом месте и времени. К перформансу можно отнести любую ситуацию, включающую четыре базовых элемента: время, место, тело художника и отношения художника и зрителя
Плагин для программы	независимо компилируемый программный модуль, динамически подключаемый к основной программе и предназначенный для расширения и/или использования её возможностей
Принцип естественного отбора	основной фактор эволюции, в результате действия которого в популяции увеличивается число особей, обладающих более высокой приспособленностью к условиям среды (наиболее благоприятными признаками), в то время как количество особей с неблагоприятными признаками уменьшается.
САПР	Система автоматизированного проектирования работ — автоматизированная система
Скрипт Компьютерный код	высокоуровневый язык сценариев — кратких описаний действий, выполняемых системой.
Стигмергия	механизм спонтанного непрямого взаимодействия между индивидами, заключающийся в оставлении индивидами в окружающей среде меток, стимулирующих дальнейшую активность других индивидов
Технология пескопечати	Технология печати 3Д принтера, основным материалом которого является песок
Топологические оптимизации	метод, который позволяет получать новые, более эффективные топологии инженерных конструкций при заданных целевой функции и наложенных ограничениях.
Триангуляция	один из методов создания сети опорных геодезических пунктов, а также сама эта сеть. Заключается в геодезическом построении на местности системы пунктов,

	образующих треугольники, у которых измеряются все углы и длины некоторых базовых сторон
Фракталы	множество, обладающее свойством самоподобия
Цифровое производство (3D печать, ЧПУ, роботизированное производство)	интегрированная система, в которую входят инструменты численного моделирования, 3D-визуализации, аналитики и совместной работы. Что позволяет одновременно выполнять конструкторско-технологическую подготовку
Эвристический алгоритм	алгоритм решения задачи, включающий практический метод, не являющийся гарантированно точным или оптимальным, но достаточный для решения поставленной задачи. Позволяет ускорить решение задачи в тех случаях, когда точное решение не может быть найдено

1.2. Основные исторические прецеденты развития генеративных подходов

1.2.1. Прототипы цифровой архитектуры

Античные амфитеатры как воплощение идеальной формы

Цель применения цифровых методов связана с выполнением трех важных аспектов архитектуры: польза, прочность, красота. Помимо основных факторов, цифровые методы предполагают адаптировать архитектуру путем оптимизации формы так, чтобы идеально вписываться в климатический и топографический контекст.

Прототипами цифрового подхода в архитектуре являются античные амфитеатры: например, Античный амфитеатр Одеон являлся одним из самых больших театров в Древней Греции и самым большим на территории Фессалии (рис. 24). Его вместимость составляла 10 000 человек. Характеристики амфитеатра говорят об идеальном воплощении формы, ведь данное сооружение представляет собой пространство для размещения людей (польза), античный амфитеатр воплощает эстетику своего времени (красота), объем расположен в естественной

впадине рельефа (что делает его одновременно прочным и адаптивным), а также амфитеатр обладает идеальными акустическими характеристиками, и обзор на сцену доступен с любых точек расположения человека за счет ступенчатости объемов зрительских мест.

Основные цели прообразов цифровых методов, которые актуальны для сегодняшнего времени:

1. Польза, прочность, красота архитектуры.
2. Адаптивность, многофункциональность элементов сооружения (здания) (дополнительные правила).

В данном контексте многофункциональность означает, что ступенчатость амфитеатра одновременно выполняет несколько функций: комфортное расположение зрителей в пространстве, обеспечение наилучших акустических характеристик, условное повторение впадины рельефа на участке строительства.

1.2.2. Творческие методы поиска формы А. Гауди, основанные на применении физических симуляций

Творческие методы Антонио Гауди как прообраз цифровых симуляций архитектурных форм.

А. Гауди является одним из самых прогрессивных архитекторов конца XIX века, именно его эксперименты являлись примером воплощения научно-технической мысли (рис. 25). Архитектор не только создавал красивые, инновационные объекты, но и разрабатывал оптимизированную структуру. Гауди является основоположником модерна, где искусство архитектуры сочетается с природными формами. Неоценим вклад архитектора в становление нового стиля и подхода к архитектуре: плавные формы, уникальный дизайн, проработка и внедрение нового стиля в интерьерные решения. Наиболее заметным и интересным объектом с точки зрения прообраза цифровых симуляций является собор Саграда Фамилия. На этапе поиска формы Антонио Гауди подвешивал грузы с разным весом на нити, в результате чего получалась перевернутая форма купола, которую

впоследствии воплотили в жизнь (рис. 26, 27). Еще на этапе творческого поиска купол был успешно протестирован на прочность и деформации, что доказало эффективность творческих методов Гауди.

Методы Антонио Гауди стали прообразом генеративного моделирования, в частности метода физических симуляций архитектурных объемов.

1.2.3. Изучение методов поиска формы архитектора и ученого Ф. Отто на основе экспериментального подхода

Творческий подход лауреата Притцкеровской премии Фрая Отто является прямым прообразом цифровых методов, так как метод данного мастера основан на постоянном анализе природных структур и процессов. Данный анализ переходит в разряд прикладных методов поиска формы. Природные формы априори уникальны, так как каждый элемент оптимизирован под свою функцию и контекст.

Стоит обратить внимание на исследования Института легких конструкций (Германия), где проводили большое количество экспериментов, связанных с симуляциями. Можно отметить несколько важных примеров, которые в дальнейшем повлияли на логику работы архитектурных инструментов программирования в рамках процесса поиска формы.

1. Эксперименты с мыльными пузырями основаны на природном принципе минимальных поверхностей: в данном случае отправной точкой является расстояние между опорами, их количество и конфигурация (рис. 28). Мыльный раствор, попадая на такую конструкцию, образует минимальную оболочку, которая является наиболее прочным и функциональным решением с точки зрения перекрывания больших пролетов. Ярким примером здания, созданного при помощи такого подхода, является Олимпийский стадион 1972 года в Мюнхене (рис. 29).

Мембраны, сделанные из жидкостей, известные как «мыльные пленки», образуются, когда замкнутый каркас опускают в мембранообразующую жидкость и затем вынимают. Каркасы могут быть сделаны из тонкой проволоки или нитей. Самая известная мембранообразующая жидкость – мыльный щелочной раствор.

Наиболее тонкие мембраны получаются из дистиллированной воды с несколькими каплями моющего средства или мыльных пузырей «Pustefix». Мембрана, подвешенная на каркасе, обладает совершенно особыми качествами. В плоском каркасе она плоская, в неплоском каркасе она в основном изгибается, приобретая седловидную форму. Мыльная пленка всегда сокращается до наименьшей возможной поверхности. Затем она принимает форму «минимальной поверхности», которая четко определена математически. Жидкие мембраны испытывают одинаковое натяжение в любой точке [5]. В эксперименте задействованы предварительно напряженные, нежесткие к изгибу и плоские несущие конструкции, которые при этом испытывают растяжение.

Формы, полученные в экспериментах, могут предоставлять невероятно точные модели для форм тентовых конструкций. Фрай Отто использовал это сходство, что привело к качественно новой архитектуре тентов. Эксперимент с мыльной пленкой может также быть использован, чтобы проверить, является ли совершенно оптимальным распределение напряжения в существующих тентах, путем создания каркаса для экспериментов, предельно близкого к настоящему сооружению. Когда тенты заметно отклоняются от формы минимальной площади, это видно и неопытному глазу, они не просто выглядят неправильно, а обычно плохо сконструированы.

«Машина мыльных пленок» была разработана и создана в Институте легких конструкций (Institute for Lightweight Structures) для геометрического регистрирования и измерения моделей из мыльных пленок: модели из мыльных пленок могут быть сохранены на более длительный срок в климатической камере.

Направленное освещение используется для проецирования моделей в реальных размерах на фотопластинку или на пластинку молочного стекла; затем изображение фотографируется и измеряется. Формы, полученные с помощью эксперимента с мыльной пленкой, воплощены в проектные и рабочие модели из широкого ассортимента материалов и использованы для дальнейшей переработки в рамках процесса проектирования. Существует бесконечно много различных форм

мыльных пленок или минимальных поверхностей, на основе которых могут быть созданы мембранные конструкции разнообразных типов.

На ранней стадии поиска формы Фрай Отто экспериментировал с конструкциями тентов и с различными натяжениями мембран. Для этого он использовал сети, сделанные из резиновых пружин. Конструкции такого типа были использованы для самолетного ангара. Существуют некоторые вариации мыльных пленок:

1) Мыльная пленка в аэродинамической трубе.

2) Мыльная пленка в виде остроконечного тента.

3) Машина мыльных пленок в Институте Легковесных Конструкций с моделью из мыльной пленки в камере, с направленным освещением [48].

4) Мыльная пленка в виде четырехконечного паруса.

5) Мыльная пленка. Пронизывание спиральной площади плоской пластиной.

6) Модель из мыльной пленки в круге с вертикальной перепонкой.

2. Эксперименты с нитями. В данном эксперименте были завязаны нити от одного края круга до другого. Получившуюся структуру с большим количеством переплетенных нитей поместили в воду, после чего нити образовали более круглые связи между собой. Анализ показал, что переплетение путей стало оптимально короче (рис. 30). Такой подход можно применить при решении прокладки транспортных узлов и путей, а значит, достичь минимальных расстояний между населенными пунктами и избежать сложных развязок на дорогах.

В рамках технологии модели, возможно отразить прямую систему путей, в которой каждая точка начала движения соединена прямой линией с точкой-назначением с помощью нитей (например, резиновыми нитями). С точки зрения движения прямая система путей идеальна. В ней не существует окольных путей, крюков. Но суммарная длина путей и площадь, занимаемая прямой системой путей, очень велика. Минимальная система путей идеальна для маршрутов движения транспорта (пешеходных и велосипедных дорожек, дорог, железнодорожных линий, шоссе). Если целью является исследование форм с минимальными требованиями к изготовлению, содержанию и действию системы путей (дорожной сети) и движения,

то особенно подходит модель, использующая смоченные нити с «ограниченным удлинением».

Система «минимальных окольных путей» стремится к минимуму в показателях энергии, необходимой для строительства и обеспечения дорог и для движения в целом. Такая методика эксперимента применима для исследования систем распределения сил, особенно в решетчатых конструкциях, сделанных из работающих на сжатие и изгиб гибких стержней. Здесь сближения, стягивания дают небольшое удлинение системы распределения сил, но также и меньший расход материала из-за уменьшения приведенной (расчетной) длины (при расчете на продольный изгиб) и ширины пролета в свету. Созданы типичные ветвящиеся конструкции, которые при определенных обстоятельствах могут быть связаны с внешним видом лиственных деревьев.

3. Эксперименты с клеем и тканью. Ф. Отто помещал жидкий клей между плотными кусками ткани, затем, до того, как они высохли, раскрывал куски и смотрел на поведение структуры клея при распространении между частями ткани (рис. 31). Эксперимент показал интересные структуры, которые впоследствии архитектор использовал как минимальные опоры [35]. Фрай Отто вдохновлялся природой, которая воплощалась в его экспериментах, доказывающих целесообразность и оптимизацию применения таких методов (рис. 32). Здесь можно провести параллель и с цифровыми инструментами, например: симуляции и агентные системы; то же можно сказать о прообразности методов Ф. Отто [34].

После 1965 года архитектор уже применял компьютер для расчета своих архитектурных объектов.

1.2.4. Основные принципы формообразования геодезических куполов Б. Фуллера

Б. Фуллер являлся одним из самых прогрессивных ученых архитектурного мира. Мастер работал на стыке наук: географии, философии, геометрии, математики, социологии, архитектурной физики. Таким образом, исследования в одной области наук помогли Фуллеру найти новые методы архитектурного формообразования [16]. Его главное сооружение – геодезический купол: это пространственная стальная сетчатая оболочка из прямых стержней (рис. 33). Данный архитектурный объект является воплощением исследований и экспериментов минимальных поверхностей и сетчатых оболочек. В начале XX века зародился авангард архитектурной мысли, следовательно, важным являлось найти технологии и конструкции, с помощью которых можно было бы реализовать любую смелую идею. Фуллер изучал сетчатые оболочки, Платоновы тела, отталкивался от исследований Шухова, после чего проводил эксперименты со структурой сетчатых оболочек, начиная от малых форм и заканчивая куполами и сферами. Норман Фостер, талантливый ученик Б. Фуллера, продолжил дело учителя, создавая уникальные и технологичные архитектурные объекты (рис. 34).

Б. Фуллер изучал пространственные симметрии правильных многогранников, чтобы решить конструктивные проблемы при поиске формы. Данная геометрия была использована архитектором для проектирования легких сборных и транспортабельных структур. Математическая программа, полученная из геодезических делений сферы и множественных симметрий многогранников, создала как архитектурную форму, так и реальную конструкцию. Б. Фуллер применил тот же метод для решения проблемы изображения Земли, придумав инновационную картографическую проекцию, специально предназначенную для использования в аэронавигации.

Необходимо отметить вклад в формирование нового параметрического направления знаменитого математика-геометра Х.М.С. Коксетера (1907–2003), который был ключевым ученым в исследовании последних математических

интерпретаций архитектуры, основанных на топологии и теории хаоса. Отправной точкой исследования Х. Коксетера была симметричная структура калейдоскопа, из которой он разработал исследование многогранников. Это сложные объекты в многомерном пространстве; они не существуют в реальном мире, но могут быть описаны математически. Купола Фуллера также вдохновлены исследованиями Коксетера, посвященными космической симметрии, которые привели к открытию новой формы кристаллизации углерода. «Buckyballs» – это пустые сферы с 60 атомами углерода на поверхности, которые образуют сетку из шестиугольных элементов.

1.2.5. Методы поиска формы с учетом различных параметров криволинейной геометрии архитекторов Л. Моретти и Ф. Кислера

Рассматривая архитектуру, созданную вычислительными методами некоторых крупнейших архитектурных фирм мира, сложно понять связь с историей архитектуры, но сама концепция параметризма продемонстрировала связь с именами Антонио Гауди, Фрая Отто, которые по праву являются одними из наиболее упоминаемых в качестве ключевых фигур данного направления, однако не единственными. Джон Фрейзер (2016) написал статью, посвященную итальянскому архитектору Луиджи Моретти [12], архитектору, который на самом деле первым сформулировал концепцию параметрической архитектуры еще в 1940 году.

Мысли Моретти и его приверженность распространению параметрической архитектуры сделали его сопоставимым с Патриком Шумахером, архитектором и теоретиком архитектуры, который запустил параметризм, продвигая его как новый глобальный стиль (Шумахер, 2009) [58]. Л. Моретти основал Институт исследования процессов прикладной математики в урбанизме, который являлся местом его первых вычислительных экспериментов [15].

Восприятие объектов и пространства – тема, представляющая большой интерес для параметризма (Schumacher, 2012). Моретти начинает формулировать ее в контексте разбора параметрической архитектуры и говорит о том, как формы

воспринимаются человеком. Это происходит через различия (отношения) между формами, каждый объем может быть определен его различием, поэтому наше восприятие реальности ассимилируется с системой упорядоченных различий в ритме, который составляет закон формы. Чтобы продолжить рассуждения, Моретти проводит математическую аналогию, ссылаясь на теорию Галуа (Viati Navone, 2010), определяя систему различия в группе. Группа не качество формы, а набор мгновенных отношений: большое количество различий, присутствующих в форме, делает более яркое восприятие формы людьми. Затем Моретти подтверждает, что группа различий, которые мы можем воспринимать одновременно, ограничена, и определяет их как цепочку. Восприятие сложной и унитарной формы происходит, следовательно, через поток серии связей. Каждая связь взаимодействует со следующими отношениями, которые формируют порядок, так что связь может быть определена как изоморфизм в группе различия. (Хофштадтер, 1980) [15].

Моретти перечисляет различные типы структур в архитектуре: структура кьяроскуро, структура статических отношений, структура пространств, структура пластических отношений, структура поверхностей, структура плотности света и т.д. Все эти примеры отношений взаимозависимы (изоморфны), и новый подход необходим для управления ими вместе, что и является параметрической архитектурой. На самом деле с помощью научных дисциплин и количественного математического анализа параметрической архитектуры можно строго определить все параметры, которые генерируют форму.

Моретти создает лучшее решение для удовлетворения потребностей архитектора, отвергая любой эмпирический выбор, предпочитая научный метод для функционального решения объема и в то же время свободу выражения архитектора, рассматривая проектировщика как художника, способного управлять всем архитектурным процессом (Diemoz, 1936). Данный тезис отмечает одно из самых важных отличий теории параметризма Шумахера, которая заявляет о необходимости дифференциации искусства и архитектуры, а также науки и архитектуры (Шумахер, 2011, стр. 144). Позиция Моретти в отношении традиции является еще одной фундаментальной характеристикой его мысли, если

традиционные факты должны быть проанализированы в соответствии с требованиями параметрической архитектуры. Данная концепция возникает из анализа примеров великих мастеров.

Сравнивая идеи Моретти с выводами нынешних архитекторов и ученых, можно понять, каким образом ученому удалось понять различные отношения между формой и структурой, приходя к выводам нынешней архитектурной культуры, сформулированной сквозь призму экспериментов и вычислительных методов.

На данный момент является важным восстановить теории Моретти и исследования параметров, которые могли бы найти новое пространство в области архитектуры больших данных благодаря машинным методам обучения, искусственному интеллекту и робототехнике [91].

Фридрих Кислер был сторонником гибкой пространственной концепции, которая способна обеспечить оптимальный ответ на различные социальные проблемы и виды применения архитектурных пространств. Первоначальная форма «Бесконечного дома» изображает сплюснутый сфероид, который стал основой для Манифеста Корреализма Ф. Кислера (рис. 35).

Один из его главных аргументов в пользу получения формы – это то, что она основана на системе освещения; форма, которая позволила бы достаточному количеству света проникать в каждый угол комнаты, не будучи сломанным внутренними стенами обычного здания (рис. 36).

Модели архитектора демонстрируют плавные переходы через пространства с лестницей, внутренним и внешним видом и сплошными поверхностями. Эскизы, образцы моделей и описания показывают предполагаемую материальность дома; железобетон на модульной сетке. Окна покрыты полупрозрачным формованным пластиком, образующим отверстия неправильной формы. Бассейны заменяли обычные ванны, рассредоточенные по всему дому. Экспозиция «Бесконечного дома» была представлена в Музее современного искусства с 1958 по 1959 годы. Были представлены модели и фотографии процесса моделирования, а также неортогональные архитектурные чертежи, которые он назвал «многомерными», часто сравниваемые с сюрреалистическими автоматическими рисунками.

1.2.6. Основные принципы формообразования С. Прайса и его влияние на современные роботизированные эксперименты в архитектуре

Большинство идей Седрика Прайса не были реализованы, однако с учетом развития технологий принципы, связанные с кибернетическими исследованиями проекта Дворца Развлечений, являются как никогда актуальными (рис. 37). Проект Fun Palace предназначен для возможного взаимодействия с искусственным интеллектом и посетителями здания (рис. 38). Рассматривая исследования С. Прайса, стоит подробнее описать проект Дворца Развлечений, который был разработан совместно с театральным продюсером Джоаном Литтлвудом. Дворец Развлечений объединяет такие функции, как досуг, образование и производственную деятельность, образуя социальный центр, способный преобразовывать пространство и взаимодействовать со своими пользователями (рис. 39). Размывая границы между двумя противоположностями: работой и отдыхом, – Дворец Развлечений стремится занимать демократизирующую роль, обеспечивая всеобщий доступ к модели личного обучения и развития вне элитизма традиционных институтов.

С. Прайс описывает Дворец развлечений как гигантскую механизированную верфь, где все строительные элементы постоянно перемещаются крановой системой, которая обеспечивает полную трансформацию комплекса. Формально Дворец Развлечений не представляет собой обычное здание – это, скорее, структурная конструкция, способная реагировать на социальные необходимости и адаптироваться к ним. Во всех версиях проекта Дворца Развлечений инфраструктура позволяет постоянно адаптировать проект, в то время как все остальное воспринимается как открытая архитектура, предназначенная для сборки и разборки в комплекс, который определяется последовательностью событий, проводимых в нем. Хотя Дворец Развлечений не является классическим проектом, разработка процесса проектирования состоит из систематического поиска порядка в пределах возможностей данного преобразования. Стоит отметить, что более широко

опубликованные рисунки, которые представили проект Дворца Развлечений, концентрируются на выявлении постоянного движения и динамики, что влечет за собой сопоставления и противоречия. Тем не менее, чертежи, касающиеся процесса разработки проекта, ориентированы на создание стандартизированного модульного объема, что позволяет обеспечить универсальность компонентов и расширение возможных альтернатив через постоянную трансформацию проекта.

Концептуально такой подход предполагает перемещение внимания от произведения, состоящего из элементов, к созданию интерактивной системы, состоящей из событий. Движение и преобразование Дворца Развлечений становятся важнее, чем его физические компоненты, поскольку в контексте целей проекта здание может иметь столько форм, сколько потребуют его посетители. Концепция Дворца Развлечений соответствует самым грубым выражениям промышленных элементов, данное состояние не более чем отражение отсутствия акцента на архитектурном уровне по сравнению с перформативными возможностями здания. Для достижения идеи постоянного изменения предполагалось использовать технологии, которые уже были доступны в 70-х годах XX века (или «в 1970-х годах?») для военно-морской и авиационной промышленности, то есть с использованием точной и тщательно разработанной технологии для создания открытой, неопределенной схемы как способа расширения возможностей и свободы пользователей таких пространств. Кроме того, данная концепция подразумевает преодоление идеи программы. Сосредоточив внимание на взаимодействии с пользователем, Дворец Развлечений предполагает изменение парадигмы путем перемещения механистического понятия машинной функции в направлении кибернетического понятия система–цель.

В кибернетических терминах система представляет собой артефакт с субопределенной функцией, способной преобразовывать и переопределять свой взгляд на цель. В отличие от идеи машины, унаследованной от промышленной революции, кибернетическая система способна исправить и переопределить его функции с учетом достижения конкретной цели. В этих терминах сам по себе Дворец Развлечений является кибернетической системой с целью радовать своих

пользователей: у него есть открыто поставленная цель, что позволяет расширить альтернативы развития проекта. Как следствие, в программе заложены все функции, необходимые для достижения данной цели. Концепция Дворца Развлечений заключалась в постоянном создании чувства восторга у посетителей, взаимодействие здания и посетителя должно не только меняться со временем, но и знать о типе ответа, который может получить здание от аудитории. Данные изменения основаны на включении кибернетической концепции в наше мышление и управление проектом. Даже до создания адаптивной и трансформируемой архитектуры этот процесс мышления и развития архитектуры понимался как кибернетический процесс. Проектная документация Дворца Развлечений показывает процесс, основанный на исследовании технологических разработок, в отличие от создания традиционного архитектурного проекта. Вышеперечисленные инструменты ориентируют процесс проектирования на достижение конкретных целей, которые переопределяются в каждом из процессов разработки проекта. Примером такого подхода может служить диаграмма PERT (оценка программ и техника обзора), которая была разработана ВМС США в 50-е годы XX века как статистическая методология, ориентированная на развитие проекта. Процесс проектирования Дворца Развлечений выражается через диаграмму PERT, которая излагает последовательность выполнения задач и выявление взаимозависимостей, позволяющих перейти к следующим задачам. В то же время С. Прайс был полностью осведомлен о концептуальных последствиях и новых парадигмах, которые воплощает Дворец Развлечений. Первая проблема однозначна: «Организовать как можно больше форм для развлечения посетителей в одном месте», как и в предложенном решении: «Разнообразить и создать постоянно меняющиеся виды деятельности, которые будут определять форму пятна застройки».

Подход С. Прайса заключался в понимании архитектурного проекта как связи организованной и систематизированной информации, в которой пользователи играют важную роль. Данная идея системы является чертой вычислительной парадигмы, на которой базируются современные технологии, позволяя воспринимать архитектурный проект как информационную систему, где

материальность (проектные решения) каждого элемента будет сосредоточена вокруг образования универсальных частей, которые могут быть разобраны и использованы заново.

1.3. Мировой опыт внедрения цифровых методов в архитектуру в XX–XXI веке

1.3.1. Внедрение компьютерных методов в работах архитектора Ф. Гэри

Необходимо отметить вклад Ф. Гэри в практическую архитектурную деятельность. В частности, стоит рассмотреть объект концертного зала У. Диснея в Лос-Анджелесе, который обладает сложной архитектурной формой (рис. 40). Важно понять процесс разработки данного архитектурного объекта и тот шаг, который повлиял на непосредственное внедрение цифровых инструментов в архитектурную деятельность. Концертный зал Диснея был изначально изображен Ф. Гэри на бумаге, то есть данный объект является рукотворным произведением мастера, без первоначального влияния компьютера. Однако для реализации такого вида архитектуры необходимо было придумать новый подход, который заключался в переносе разработанной геометрии в цифровую среду для дальнейшего развития (рис. 41). На данном этапе важным было подобрать подходящую программу, которая бы максимально правдоподобно отразила идею архитектора. Таким программным обеспечением стал инструмент, разработанный программистами и конструкторами для расчета и выпуска документации для элементов самолета. Данная программа была адаптирована архитекторами, получив название Gehry Technologies, которая впоследствии применялась для реализации проекта концертного зала в Лос-Анджелесе.

1.3.2. Творческий метод З. Хадид и его влияние на прогрессивные разработки современных методов моделирования

Архитектурное бюро Zaha Hadid Architects внесло неоценимый вклад в развитие технологий в контексте архитектурного проектирования. Здесь стоит

отметить исследования Патрика Шумахера, который смог внедрить цифровые методы в работу бюро. Изначально основатель Заха Хадид вдохновлялась работами советских авангардистов (К. Малевича, Э. Лисицкого) и арабской каллиграфией (рис. 42–44). Спустя некоторое время развитие технологий и сложность разрабатываемых архитектурных форм подтолкнули архитекторов бюро к использованию альтернативных источников формообразования и дальнейшего выпуска чертежей.

Архитекторы бюро Zaha Hadid Architects используют цифровые инструменты для вдохновения (при симуляции физических процессов), оптимизации разработанной геометрии, создания раскладки деталей для выпуска рабочей документации, поиска решений определенных архитектурных задач. Стоит выделить здание отеля Morphosis в Макао (Китай), которое было полностью разработано с помощью цифровых методов, от стадии эскизирования до стадии выпуска рабочей документации, что доказывает непосредственное влияние компьютера на создание сложных форм (рис. 45, 46).

Патрик Шумахер представил “Манифест Параметризма” в 2008 году. Данное направление вытекает из творческого применения систем параметрического проектирования в ходе соответствия все более сложным социальным процессам и институтам. Термин «параметризм» подразумевает, что все элементы архитектуры становятся параметрически гибкими и, таким образом, адаптивными друг к другу и к контексту, вместо совмещения нескольких платоновых тел (кубов, цилиндров и т.д.) в простые композиции – как раньше делали архитекторы в рамках предыдущих стилей последних лет. Работа Zaha Hadid Architects подразумевает внедрение изменчивых и адаптивных форм в совокупности с непрерывно дифференцированными полями или системами. Стоит выделить следующие процессы параметрического проектирования: параметрическая взаимосвязь подсистем, параметрическая акцентуация, параметрическая конфигурация, параметрическая рефлексия и параметрический урбанизм. Среди пяти перечисленных выше систем параметрический урбанизм обеспечивает прочную основу для остальных четырех. Предполагается, что городская застройка описывает

процесс формирования многих зданий, в результате чего городские перестройки, расстояния между зданиями и ориентация задаются по сценарию функционального наполнения архитектуры. Кроме того, систематическая модуляция архитектурной морфологии производит мощное городское влияние и облегчает ориентацию здания в пространстве [45].

Целью применения параметрических методов является глубокая реляционность, полная интеграция развивающейся антропогенной среды, от городского распределения до архитектурной морфологии, обеспечивая детальную тектоническую артикуляцию и интерьерную организацию. Таким образом, в контексте параметрического урбанизма можно применять параметрические акцентуации, конфигурации и рефлексирование как инструмент достижения глубокой относительности. Параметрические инструменты предлагают сложные конфигурации, в которых несколько правил можно воплотить в гибкую параметрическую модель с переменной для различных потенциалов, которые встроены в конфигурацию общей модели. Данные параметры могут включать в себя относительную форму, свет, цвет, прозрачность, контекст и т.д. как переменные для управления возникающей реорганизацией расположения. В рамках параметризма отношения между городской тканью и зданиями опираются на настройки генеративных систем, которые распространяются и моделируют городскую ткань [88].

1.3.3. Применение компьютерных методов для поиска новых архитектурных форм в работе Т. Ито и А. Исодзаки

Создание генеративной стратегии эквивалентно разработке научного эксперимента, в котором исследователь определяет три основных аспекта: элементы, которые принимают участие в эксперименте, первоначальное расположение этих элементов и общий закон, который определяет, как эти элементы должны взаимодействовать друг с другом (алгоритм) [46, 79]. В результате исследователь должен выполнить эксперимент, который состоит из расчета и

моделирования всех возможных взаимодействий между базовыми элементами, именно здесь компьютер и его вычислительные возможности становятся необходимыми инструментами (рис. 47, 48). В параметрических стратегиях инструмент строит и контролирует все отношения между элементами проекта, архитектор разрабатывает шаги и взаимосвязи отношений. С другой стороны, в генеративных стратегиях архитектор контролирует только начальные условия; все промежуточные этапы, необходимые для определения окончательной формы, разрабатываются неявным или скрытым образом внутри компьютера. Степень неопределенности и экспериментальности возрастает, но всегда существует уверенность в том, что, независимо от полученного результата, форма будет полностью соответствовать условиям или законам, установленным вначале.

Зачастую генеративные стратегии подразумевают создание сложных форм, возникающих на основе простых законов, нарушающих линейность человеческой интуиции и рациональности. Такой тип стратегии, где потребность в компьютере как средстве формообразования становится более важным, это инструмент, способный исследовать территории познания, доселе недоступные человеческому разуму. Генеративные процессы, описанные в алгоритмах, могут быть искусственного происхождения, то есть разработанные архитектором и основанные на чисто интеллектуальных критериях, понимаемых как прямая трансляция процессов и реальных явлений, присутствующих в природе. Во втором случае, как правило, наиболее актуальной формулировкой алгоритма является следствие наблюдения количественной оценки и формализация реальных явлений. Алгоритмы оптимизации характеризуются четко определенной целью. Целью данных алгоритмов является оптимизация процессов, выявление наиболее подходящих решений среди всех возможных вариантов. В области архитектуры такие ресурсы используются для создания форм, которые могут оптимизировать конструктивные характеристики, степень воздействия климата на геометрию здания и т.д. Следует отметить, что генеративные процессы «поиска форм» не являются исключительными для цифровой эпохи, так как они уже присутствовали гораздо раньше в работах таких мастеров, как Антонио Гауди и Фрай Отто.

Стоит выделить проект Национального конференц-центра в Дохе (Катаре), разработанный Аратой Исодзаки (2011 г.) в сотрудничестве с инженером Муцуро Сасаки (рис. 49). Форма конструкции здания была разработана с помощью «Расширенного метода эволюционной конструктивной оптимизации» (Extended ESO method). Данный метод основан на природном процессе роста корней «субтропического баньянового дерева». С вычислительной точки зрения алгоритмы оптимизации характеризуются наличием более сложной структуры, так как закон генерации дополнен оценочными и коммуникационными циклами, что позволяет проводить несколько итераций, прогрессивно продвигаясь к результатам и конечной цели.

1.3.4. Внедрение компьютерных методов в работе и особенности процесса формообразования Г. Линн

Поле деятельности давно основано на понятии произведения искусства или архитектуры как неотъемлемого объекта, который должен быть сохранен в неизменном виде на все времена. Новые технологии внесли в процесс архитектурного проектирования дополнительную сложность по ряду причин: долгосрочная устойчивость, новые материалы, еще не изученные по сравнению с традиционными материалами, такими как камень, или даже более эфемерными – как бумага [5]. Цифровые объекты зависят от технологической среды, специфичной для времени их создания: аппаратного обеспечения, операционной системы, программного обеспечения и механизмов вывода.

В настоящее время цифровые инструменты повсеместно применяются для работ архитектурных бюро. Такие учреждения связаны с культурными последствиями цифровой архитектуры, а также с архитекторами, которые интенсивно используют новые технологии. Грег Линн, чья фирма Greg Lynn FORM была под впечатлением от технического потенциала и культурного последствия цифрового проектирования с момента его образования в конце 1990-х годов. Одним из самых ранних проектов в этой области был эмбриологический дом (1997–2002).

Это была возможность исследовать, разрабатывать и тестировать варианты цифрового сохранения архитектуры с потенциально широкими приложениями.

Грег Линн делал все, чтобы проект эмбриологического дома стал новаторским проектом в сфере цифрового проектирования: это архитектура, в которой компьютерная мощь выходит далеко за рамки статуса простого инструмента для черчения (рис. 50). Работа Линна формирует “живые” объекты будущего, на которые ссылается архитектор как «одушевленная форма» или, в более самоуничижительный поворот фразы, «блобитектура» – термин, полученный Линном от вычислительного термина «Большой двоичный объект», который относится к аморфному набору информации, хранящейся в базе данных. Для Грега Линна архитектура резонирует с современными культурными и технологическими условиями. В данном случае такие условия требуют переосмысления как средства производства и типологии дома как архитектурной концепции, благодаря экспериментам Линна с «массовой надстройкой». Пытаясь выйти за рамки классических и современных идей модуля (на основе разделения целого на гармонично пропорциональные части, или сборки элементов в современный «комплект деталей»), Грег Линн дал возможность манипуляции с органически гибким примитивом, из которого может быть сгенерировано бесконечное число итераций.

Взаимодействие «общего» и «вариантов» подразумевает, что в таком переосмыслении деятельность архитектора превратилась в «брендинг» и удовлетворение индивидуального желания проходит через уникальные потребительские версии продукта. В качестве проверки принципов и роли возможностей не существует единого или окончательного варианта эмбриологического дома, так как в концепцию проекта закладывались множественность и открытость. Для достижения целей проекта Грег Линн разработал проект эмбриологического дома через взаимодействие инновационного программного обеспечения для геометрического моделирования и анимации персонажей, с одной стороны, и сгенерированные цифровым способом физические модели – с другой. Ключевым инструментом было программное обеспечение Microstation, выбранное за способность моделировать сложную геометрию.

Применение анимационной программы Maya помогло созданию визуализаций превращения Дома из примитива в серию вариантов.

Грег Линн перемещал модель Дома между этими программными платформами, процесс проектирования продиктовал моделирование формы, проверку на эстетические и материальные качества и последующую доработку геометрии. Периодически Грег Линн производил физические модели результатов с помощью систем быстрого прототипирования с использованием разнообразных материалов, и, исходя из данных экспериментов, образовывались серии вариантов домов. Кроме того, процесс проектирования адаптируется под периодические правки, приходящие от заказчика, для которого создаются анимации и графические макеты; таким образом, архитектура разработана при помощи итеративного и гибридного дизайна.

Данный подход привел к широкому спектру результатов в различных форматах, включая векторную графику, а также растровые изображения, анимации (MPEG, MP4), макеты печати и файлы с числовым программным управлением (ЧПУ) для автоматизированного производства (ORD, G-код, HPGL). Хотя эмбриологический дом формально не типичен для проектных работ большинства архитектурных бюро, использование широкого спектра моделирования дает значительные результаты.

Проект может быть набросан в одном программном обеспечении продукта, затем переведен в другой для разработки дизайна, в третий – для координации со смежными специалистами и для изготовления рабочих чертежей.

Многие характеристики проекта «Эмбриологический дом» соответствуют замечаниям Терез Тирни о характеристике цифровых артефактов [12]. К ним относится контекстуальность: зависимость от технологической среды и других цифровых процессов. Самым важным является то, что в эмбриологическом доме заложена природа цифровых процессов как нечто генетическое или генеративное. Генеративные архитектурные объекты не вносят тот же смысл, что рисунки или модели, которые составляют привычную архитектурную презентацию. Обычные архитектурные представления могут быть поняты как образы здания – это

подразумевает разницу между вещью и ее изображением, оригиналом и копией. Такой подход согласуется с классическим сохранением мышления, при котором объект оценивается в сравнении с тем, что представляется как его первоначальное, «истинное» состояние.

Цифровой объект, однако, нельзя воспринять таким образом: компьютерный код должен пройти процесс перехода, чтобы стать либо изображением (отображается на экране компьютера), либо зданием (выход в виде набора произведенных компонентов). Ни изображение здания, ни само здание, ни код, который генерирует его, нельзя считать истинными в классическом смысле. Суть работы заключается в переходе из одной формы в другую; таким образом, эпистемология – это онтология объекта. Такой подход всегда подразумевает потенциальную мутацию, множественность итераций и проявлений, нелинейный процесс реализации и интерактивный возникающий процесс – это не просто техника, а все вместе. Эмбриологический дом хорошо иллюстрирует такую идею. Данный процесс также демонстрирует многие из технических проблем, связанных с новой онтологией.

1.3.5. Особенности архитектуры и вдохновляющих факторов

бюро MAD Architects

Стоит отметить некоторые работы Пекинского архитектурного бюро MAD Architects, которые олицетворяют применение параметрических и генеративных методов, одновременно вдохновляясь природными формами. Одной из самых знаменитых построек MAD Architects является Оперный театр, расположенный в водно-болотных местах Харбина (Китай) в пойме на северном берегу реки Сунхуа (рис. 51). Харбинский оперный театр был спроектирован в ответ на силу и дух необузданной дикой природы северного города и холодного климата. Вдохновением для формы здания являлся прообраз ваяния ветром и водой: полученная геометрия органично вписывается в природу и рельеф местности. Проект отражает динамические отношения между городом и ландшафтом и направлен на то, чтобы соединить дух человека с природой. В соответствии с местным контекстом

извилистый и вздымающийся объем Оперного театра олицетворяет искусственный ландшафт среди снежных дюн в зимние месяцы и визуально контрастирует со статичными городскими башнями, возвышающимися рядом с рекой. Облицованная алюминиевыми панелями, внешняя оболочка концептуально ваяется ветром и водой, и эта тема продолжается во внутренних пространствах здания. Геометрия Оперного театра сочетает в себе историческое китайское ремесло с современными цифровыми технологиями. Архитектурная процессия ставит хореографию концептуального повествования, которое превращает посетителей в исполнителей.

Стоит также рассмотреть проект Центра Гималаев Нанкин Зендай 2012–2017 гг. в Китае. Центр Гималаев Нанкин Зендай занимает шесть городских кварталов и создает новую городскую типологию, которая объединяет природу и мегаполис (рис. 52). Объем офисных и жилых башен выделяет периферию участка и олицетворяет серию горных цепей, вырезанных из древних процессов стихий ветра и воды. Слегка изогнутые профили здания стекают, как водопад, в центральную долину, где значительные водные объекты объединяются с ландшафтом. Центр может быть прочитан во многих масштабах, от городского до человеческого. При дальнейшем рассмотрении башен можно сравнить данные объемы с органическими горами; в масштабе здания белые изогнутые стеклянные жалюзи создают тени и глубину на фасадах здания.

Важно отметить, что архитекторы MAD основывают свою архитектуру на природных образах и субъективной эстетике, которую впоследствии производят благодаря цифровым методам.

1.3.6. Инновационные методы в работе бюро Kokkugia

Стоит выделить экспериментальное архитектурное бюро Kokkugia, которое занимается исследованием влияния цифровых инструментов на архитектуру, в частности – агентными системами. Kokkugia возглавляют Роланд Снукс и Роберт Стюарт-Смит, с лабораториями в Мельбурне и Лондоне, которые проводят эксперименты, исследования и обучение в области проектирования (рис. 53).

Роль Kokkugia весьма спекулятивна – представить себе будущее. Работы Kokkugia были опубликованы и выставлены на международном уровне, в том числе в Нью-Йорке, Лондоне, Париже, Мельбурне, Шанхае, Пекине, Москве, Киеве, Филадельфии и Сан-Франциско. Партнеры Kokkugia преподавали во многих архитектурных школах, включая Школу архитектуры AA DRL, GSAPP Колумбии, UPenn, SCI-Arc, UCLA, Pratt, USC, UEL и RMIT.

Повестка дня Kokkugia заключается в разработке нелинейной архитектуры, которая возникает в результате применения сложных систем и ставит под сомнение сложившуюся иерархию, которая работает в архитектуре (рис. 54а, б). Это методологическое исследование направлено на разработку поведенческого процесса проектирования, в котором намерение проектирования работает через локальное поведение, а не через явное описание или параметрическое манипулирование формой и организацией. Данный подход включает в себя кодирование простых архитектурных решений в распределенной системе автономных вычислительных объектов или агентов. Именно взаимодействие этих агентов и их локальных решений самоорганизуется замысел проектирования, порождая форму коллективного разума и возникающего поведения в глобальном масштабе. Это позволяет переосмыслить материю в процессе проектирования, переход от формы навязываемой инертной материи к материи, играющей активную роль в появлении формы.

1.3.7. Особенности применения пескопечати в архитектуре и внедрение компьютерных методов в работе архитектора М.

Хансмейера

Проект Digital Grotesque, разработанный на кафедре компьютерного обеспечения Архитектурного проектирования в Швейцарском федеральном технологическом институте (ETH) архитектором М. Хансмейером, сочетает в себе элементы вычислительного проектирования и аддитивного производства для разработки интерьера помещения (рис. 55). Digital Grotesque – первое, полностью погруженное в человеческую среду пространство из 3D-печатного песчаника.

Сложная геометрия, состоящая из миллионов отдельных граней, была уникально разработана через настроенные алгоритмы. Эта геометрия печатается с разрешением от одной десятой миллиметра до размеров 16 квадратных метров большого помещения.

Digital Grotesque создается с помощью алгоритмической процедуры, называемой «сетка-грамматика», которая состоит из правил, формулирующих структуру путем рекурсивной разбивки поверхностей на меньшие части.

В подходе «сетка-грамматика» дифференциация производится путем корректировки отношений деления индивидуально для каждой поверхности на каждом этапе процесса. Топологические и топографические элементы каждой поверхности измеряются по отношению ко всей форме, а правила определяются как отношения деления поверхности. Поверхности становятся меньше из-за повторного разделения отдельных функций на несколько масштабов: из спецификации широких искривлений вплоть до создания микроскопических текстур (рис. 56). Даже когда проектирование ведется в масштабе комнаты, алгоритмы позволяют создавать спецификацию деталей, которая соответствует высоте слоя 3D-принтера 0,13 мм. Поверхности могут стать пористыми на любой стадии процесса разделения, что может привести к сложным многослойным и разветвленным топологиям, которые в полной мере используют преимущества степеней свободы 3D-принтера. Полученная форма, состоящая из сетки в 260 миллионов отдельных граней, имеет разрешение и уровень детализации, которые было бы невозможно воплотить с помощью традиционных средств, нарисованных вручную, что дает представление о потенциале аддитивного производства.

В отличие от использования традиционных технологий ЧПУ, нет необходимости моделировать отдельный процесс изготовления для материализации формы. Расчетная геометрия ограничена преобразованием поверхностей, так как она описывает объем. Для того чтобы повернуть геометрию в топологически наращиваемый объем, сетка вокселизируется с разрешением 1 мм, что дает в общей сложности 30 миллиардов вокселей (элемент объемного изображения, содержащий значение элемента растра в трехмерном пространстве). Окончательная геометрия

каждой части превращается в чистую сетку с алгоритмом видоизменяющегося куба и экспортируется как файл STL. Проект Digital Grotesque показывает, что производство 3D-элементов из песчаника открывает новые возможности архитектурного прототипирования. Такой метод может применяться как для восстановления исторических зданий, так и для строительства новых, а 3D-печатные элементы могут воплощаться не только как фасадные модули, но и как строительные системы.

Комбинируя принципы вычислительного проектирования с 3D-печатью на песке, можно материализовать архитектуру без какого-либо ручного вмешательства. Как следствие, введена новая логика архитектурного проектирования: возможность проектировать не в плане, разрезах и фасадах, а полностью в трех измерениях сразу. Строительные чертежи становятся в значительной степени устаревшими, трехмерную форму можно привести к реальности на невидимом уровне детализации и контроля. Печать самой сложной формы, которую только можно себе представить, стоит не больше, чем печать твердого куба одинаковых размеров; кроме того, на это требуется одинаковое количество времени. Печать сотен высоко индивидуализированных форм стоит не дороже, чем печать одинаковых элементов.

С точки зрения производства, высокая стоимость и сложность создания уникальных архитектурных элементов исчезла. Стоит отметить, что проектирование вычислительных процессов включает в себе постоянную динамичность – таким образом, благодаря современному производству стало возможным использование новых, подходящих инструментов. Несмотря на столь позитивную перспективу, остаются следующие проблемы применения пескопечати в архитектуре:

- дальнейшая оценка свойств материала (огнестойкость, сопротивление к погодным условиям, изоляция и т. д.), особенно в отношении долговечности;
- улучшение качества поверхности, что позволяет гладкой и герметичной поверхности не терять разрешение;
- структурная оптимизация и снижение массы конструкции;

- разработка более прочных связующих для исключения дополнительной смольной пропитки.

При использовании этих технологий орнамент и сложные геометрические формы не будут приводить к чрезмерным расходам. Вместе вычислительное проектирование и аддитивное производство обещают значительный рост композиционной и конструктивной свободы, позволяя рационализировать изготовление архитектуры.

1.3.8. Результаты внедрения методов топологических оптимизаций в работе компании Agur

Цель работы ученых из компании Agur заключалась в перепроектировании существующего узла, который является частью конструкции из стержней и тросов, применяя различные этапы и инструменты проектирования (рис. 57). В ходе работы был выполнен полный спектр испытаний с материалами, который привел к процессу сертификации, необходимой для определения продукции, произведенной с помощью аддитивного производства в строительной промышленности.

Термин «аддитивное производство» относится к целому набору различных технологий, способных обрабатывать различные группы материалов, таких как пластмассы, металлы и керамика, а также аддитивное производство определяют как “процесс соединения материалов для создания объектов с помощью 3D-данных модели, слой за слоем”.

Дальнейшие действия исследователей компании Agur были сосредоточены на сравнении конструктивных элементов, производимых традиционными и аддитивно-оптимизированными методами изготовления.

Поиск топологически-оптимизированной конструкции аддитивного производства – это процесс, который в немалой степени зависит от использования вычислительных инструментов [107]. Кроме того, внедрение единого набора требований в процесс проектирования в случае обработки тысячи нюансных конфигураций требует автоматизированного подхода. Процесс проектирования охватывает широкий спектр методов от параметрического моделирования, анализа

конечных элементов, итераций оптимизаций, моделирования органических форм до цифрового редактирования топологии сетки. Очевидным является то, что ни один из инструментов проектирования или анализа не объединяет все вышеперечисленные аспекты. В процессе проектирования были оценены различные инструменты с вариативными функциональными возможностями, которые впоследствии применили для каждого этапа проектирования. OptiStruct был выбран в качестве программы для оптимизации топологии конструкции узла, кроме того, применялось большое количество другого программного обеспечения до и после оптимизации.

Собственный вес элементов имеет большое влияние на конструкцию по сравнению с другими динамичными нагрузками: ветром, снегом, температурными колебаниями – это происходит из-за открытого характера конструкции и ее функциональности. Исследователями компании Arup было принято решение снизить вес узлов на 50%, в ходе эксперимента была пересчитана плотность силовых методов с использованием Oasys General Structural Analysis (Oasys GSA v8.6). Это было сделано для того, чтобы определить влияния на предварительное напряжение и размеры элементов конструкции (рис. 58). В итоге данного эксперимента исследователями было обнаружено равновесие с распорками меньшего размера и тросами альтернативной геометрии. Полученная оптимизированная модель имела похожее поведение сжатия в стойке, как и натяжение в тросах, которое снизилось на 20%. Учитывая расчетное пространство и граничные условия, оптимизация топологии была выполнена с программой OptiStruct (Altair Optistruct v11), пакет конструктивного анализа и оптимизации, который имеет алгоритм оптимизации и интегрированный метод конечных элементов. В сочетании с инструментом Hypermesh в качестве интерфейса предварительной обработки оптимизации топологии можно настроить цель для результата, ориентированную на проектные ограничения.

Свойства материала для нержавеющей стали были применены с пределом напряжения, установленным в 400 МПа, 80% от максимальной прочности на растяжение, после чего для оптимизации топологии было определено пространство проектирования как максимальный объем, в пределах которого могла происходить

оптимизация путем «удаления» материала (рис. 50, 60). Цель проекта заключалась в установлении минимального общего веса конструкции.

На данный момент автоматическое генеративное проектирование всех узлов в структуре конструкции невозможно провести эффективным способом. Нержавеющая сталь, используемая в производстве аддитивного узла, показала сопоставимые свойства с другими более традиционными методами производства – новые материалы, скорее всего, в будущем будут доступны для строительной индустрии. Стандартизация общих параметров технологии должна первоначально сопровождаться проверкой свойств материала и производительности на проектной основе.

1.3.9. Применение методов генеративного моделирования в работе бюро Softkill

За последние несколько лет технология трехмерной печати сделала огромный скачок, поскольку оборудование и специализированное программирование были усовершенствованы для создания полностью пригодных для использования пространств. Можно отметить многочисленные достижения в технологии 3D-печати и его потенциальное применение. 3D-печатные жилища на Луне из песка с помощью D-Shape, полномасштабные помещения с помощью KameMaker и персональный принтер под названием MakerBot – это лишь некоторые умоглядные и экспериментальные прототипы, появившиеся в результате обширных исследований и разработок. Стоит отметить архитектурную мастерскую Softkill Design, которая базируется в лаборатории исследования дизайна Школы Архитектурной ассоциации в студии Роберта Стюарта «Поведенческий вопрос». В прошлом году студия Softkill Design завершила разработку ProtoHouse 1.0, прототип дома, напечатанного в масштабе 1:33 (рис. 61).

Проект ProtoHouse от студии Softkill Design исследует границы технологий селективного лазерного спекания, разрабатывая программу, которая «микрореорганизует» печатный материал с помощью компьютерных алгоритмов и создает почти полномасштабный ProtoHouse 1.0 с высоким разрешением.

ProtoHouse 1.0 был напечатан в крупном масштабе и состоял из 30 детализированных волокнистых частей, которые были собраны в одну непрерывную консольную структуру (рис. 62). Волокна с радиусом 0,77 мм обеспечивают гибкость конструкции и формы без ущерба для прочности и долговечности.

Данный процесс позволяет изготавливать архитектурные элементы, такие как каркас, мебель, лестницы и ограждающие конструкции, за один раз. В отличие от 3D-печати на основе сжатия, которая производится тонкими слоями материала для создания формы, прототип Softkill производит легкие, четко определенные, модульные и компактно масштабируемые элементы для простоты производства и сборки (рис. 63). Процесс включает в себя последовательную тектоническую стратегию от проектирования до строительства.

ProtoHouse 2.0 основан на исследовании и разработке первой модели для производства одноэтажного здания 4x8 метров, которое будет состоять из семи крупных элементов из спеченного лазером пластика (рис. 64). Сборка данных деталей может быть произведена на месте без винтов и клея в течение 6 часов. Биопластики, которые производят волокнистые элементы, дают очень подробные результаты с гибкими текстурами и множеством применений, а легкий материал обеспечивает удобство транспортировки для сборки на месте (рис. 65). Поскольку детали легко транспортируются, данный метод подходит для удаленной установки, которая печатает модули в контролируемой среде без трудностей, связанных с площадкой, с возможностью создания полностью спроектированного и построенного здания.

Из-за стремления разработать высокооптимизированный прототип на участках были использованы алгоритмы микроматериалов, чтобы проверить их эксплуатационные характеристики. В результате испытаний была выявлена удельная плотность внешних ответвлений, которые могут рассеивать свет, выступая в качестве защиты от дождя или снега. В самых первых 3D-печатных структурах использовался песок или бетон, сейчас же в студии Softkill внедряются легкие материалы, такие как биопластик, что обеспечивает высокий уровень детализации и

возможность печатать все архитектурные элементы, вплоть до лестниц, фасадов и мебели (рис. 66).

ProtoHouse 2.0 является разработкой более ранней версии, представленной на выставке 3D Print Show в Лондоне в октябре 2012 года. Первоначальная структура органического прототипа была сделана из волокнистого нейлона, основанного на принципах роста костей. ProtoHouse 2.0 использует такой же подход. Материал размещается только там, где это необходимо, – целью было использовать наименьшее количество волокнистого нейлона для достижения прочной структуры. Исследование применения экстремально минимальных количеств материала привело к получению очень волокнистых и тонких кружевоподобных структурных компонентов [112].

1.3.10. Внедрение компьютерных методов в работе бюро ILEK

Павильон Розенштейна спроектирован и построен для выставки строительной бионики в музее Розенштейна в Штутгарте, Германия [99] (рис. 67). В качестве комплексного решения минимизации веса строительных компонентов путем точной регулировки механических свойств материала была предложена технология функционально-градиентного бетона в соответствии со структурными требованиями, например, профилем нагрузки [105]. Такая технология может быть достигнута с помощью различных стратегий, с соответствующими разработками методов проектирования и автоматизированного производства (рис. 68, 69). Исследование ученых содержит подробное описание процесса проектирования от оригинальной идеи через вычислительный дизайн, конструктивный анализ, производственные ограничения и проверку несущей способности. Сначала составляется настройка процесса проектирования в среде вычислительного дизайна, затем описываются основные этапы проектирования, начиная с поиска формы, а затем разрабатывается анализ конструкции и распределение материала. В процессе проектирования проверяются конструктивные модели прогрессивного уровня

сложности и оценивается несущая способность конечной конструкции, включая все параметры проектирования и изготовления.

Павильон как архитектурное произведение должен в первую очередь показать принципы построения биологических несущих тканей, которые могут быть переданы в архитектурном масштабе. Таким образом, принцип структурной адаптации, как биологическая стратегия для выполнения функции с минимальными ресурсами, показал себя как наиболее подходящий для решения вопросов ресурсоэффективности и был выбран в качестве основной концепции проекта. Кроме того, поразительное единство формы и функции в природе в результате естественного процесса морфогенеза легло в основу визуального образа павильона, в котором форма, конструкция и материал воспринимаются как единое целое.

Данная цель нашла свою аналогию в вычислительной среде проектирования, в которой существуют три основных логических этапа процесса проектирования: генерация форм, конструктивный анализ и распределение материалов. Данные этапы были объединены в одни цифровые рамки. Требования и ограничения были сгруппированы и назначены каждому модулю; кроме того, было выбрано программное обеспечение Rhinoceros с Grasshopper – параметрическая платформа, как наиболее подходящая среда, которая может обеспечить как геометрическое моделирование, так и конструктивное формообразование, делая возможным эффективный обмен информацией.

Как архитектурный экспонат, павильон должен был представлять собой объект, который организует пространство вокруг себя. Размышления над расположением павильона в неоклассическом интерьере музея привели к замыслу показать контраст между старой конструктивной системой и новым тектоническим обликом экспоната. С одной стороны, ритм архитектурных элементов помещения диктовал граничные условия павильона, такие как положение и расстояние между опорами, высота конструкции и габаритные размеры, а с другой стороны, типология раковины была выбрана, в отличие от массивной системы, для того чтобы лучше выразить легкий характер структуры павильона. Кроме того, площадь пола должна быть максимально свободной, чтобы обеспечить расположение других экспонатов и

распространение посетителей по комнате. Таким образом, интерпретация классического тектонического типа хранилища была выбрана в качестве предпочтительной для выполнения всех требований, упомянутых выше. Данные пространственные и функциональные условия привели к концепции павильона как структуры с четырьмя опорами, которые открыты до потолка в виде воронки. Выбор воронкообразной бетонной оболочки в качестве конструктивной типологии для павильона Розенштейна привел к нескольким требованиям относительно методов структурного проектирования. Для достижения действия оболочки форма должна быть разработана так, чтобы нагрузки воспринимались преимущественно за счет мембранных напряжений, учитывая низкую прочность бетона на растяжение, что дополнительно ограничивалось напряженным состоянием мембраны только при сжатии в качестве желаемого несущего действия. Предварительная геометрия была разработана с использованием плагина RhinoVault для программы Rhinoceros. На основе анализа сил напряжения данные инструменты использовались для нахождения геометрии оболочечных структур только для сжатия [125].

Вначале была создана плоская проекция оболочки, представляющая собой сетку, которая радиально распространялась от обозначенных опорных областей, расположенных вдоль предполагаемых путей нагрузки. Каждый внутренний участок сетки был разработан инструментом RhinoVault – как сжатие стойки, а свободные края сетки – как натяжные связи, которые позже превратились в кольцевой трос предварительного напряжения. На основании первоначальных исходных данных и в предположении самоопределения формы, определяющей нагрузки, был сформирован трехмерный объем равновесия. Требования к изготовлению и выбор материала были связаны с временным характером выставки: павильон должен быть изготовлен из отдельных сегментов, собранных на месте.

Кроме того, способ производства должен позволить изготовление тонкостенных сегментов оболочки с четко видимым рисунком распределения материалов для поддержки основного замысла проекта. В предыдущей работе исследователи из ILEK разработали метод опалубки для отливки тонкостенных геометрически сложных сегментов оболочки, во время которого бетонную деталь

получают путем отливки в полностью закрытый корпус – полость, состоящую из двух или более собранных с помощью фрезеровки деталей с ЧПУ. Важным является обеспечение высокой геометрической точности, уровень сложности зависит от параметров изготовления, таких как диаметры фрезерных элементов, этапы обработки и параметры материала (качество сырья для опалубки и типа бетонной смеси).

Для данного проекта был использован премикс SikaGrout, который был выбран как наиболее подходящий, так как его класс f1 имеет самовыравнивающиеся свойства и максимальный размер зерна не превышает 1 мм, что позволило заполнить даже филигранные части опалубки. Все вышеупомянутые производственные и материальные ограничения были включены в процесс проектирования и в значительной степени определили окончательный внешний вид объекта. Благодаря встроенной вычислительной конструкции, начиная с первой итерации, архитекторами-программистами был произведен анализ предварительных видов геометрии с использованием плагина структурного анализа Millipede программы Rhinoceros. Как и в RhinoVault, структура в Millipede подверглась анализу на статические нагрузки. Материал, который использовался для павильона SikaGrout, был смоделирован с использованием линейно-упругих механических свойств бетона C50/60. Толщина оболочки составила 30 мм, это было выявлено на основе практических ограничений изготовления и избегания повреждений при транспортировке и сборке.

Натяжная связь была смоделирована как предварительно напряженный окружной трос, несущие свойства которого были оценены путем визуализации распределения основных напряжений; кроме того, удалось скорректировать геометрию оболочки до предпочтительного напряжения. В итоге исследования была выявлена картина распределения сил внутри объема, после чего было определено и оценено влияние силы предварительного напряжения на конструктивное поведение геометрии. Соответствующее значение силы предварительного напряжения было равно 4,5 кН, что минимизирует растягивающие напряжения в оболочке при сохранении основного рисунка распределения сжимающих напряжений. Результаты

данного первоначального интегрального анализа показали, что при заданных входных параметрах диапазон основных напряжений находится между 0,95 МПа и 0,3 МПа. Данные диаграммы напряжений дают согласованную картину конструктивного поведения павильона под управлением случайных нагрузок. Полученное распределение напряжений от плагина Millipede использовалось как входной параметр для определения шаблона функциональной градации и возможности сгенерировать распределение пористости.

Наблюдения за живыми организмами могут дать творческий импульс моделирования функционально-градуированных структур. Особенно легко найти параллели с несущими структурами в тканях скелетов, так как функциональная аналогия особенно очевидна именно в таких органических элементах. В проекте павильона Розенштейна были исследованы функционально-градиентные экзоскелетные структуры морских организмов в качестве основного генератора концепции моделирования. Стоит отдельно рассмотреть функционально-градуированную пористость бетонной оболочки. Внутренняя структура позвоночника морского ежа вида *Heterocentrotus mammillatus* – стереом – демонстрирует видимую структурированную градацию уменьшения пористости от центра к краю позвоночника (рис. 70) [117]. Стоит отметить, что структура позвоночника организма характеризуется значительным разбросом пористости от 0% до 90% исключительно за счет комбинации двух переменных параметров – диаметра и размера пор. Кроме того, области высокой плотности, наоборот, показывают меньшие поры и соответственно более толстые стойки [102]. Однако тот же принцип структурной адаптации может быть реализован в разных организмах в виде различных структурных типологий (рис. 71). В более общем плане свойства конструкции, такие как ее плотность и направление, зависят не только от величины нагрузки, которую она несет, но и от типа структурного воздействия (растягивающее или сжимающее) и свойства материала, из которого он сделан (минеральное или органическое вещество). Таким образом, высокоминеральные структуры, подверженные преимущественно сжатию, обычно имеют равномерно распределенную трехмерную сеть из плотных ячеек, в то время как органические

ткани с первичными растягивающими напряжениями имеют более вытянутые «волоконнообразные» структуры [80]. Рассмотрение этих моделей помогло определить основные свойства, которые должны иметь железобетонные конструкции с функциональной направленностью, подверженные преимущественно сжимающим усилиям (рис. 72).

Исходя из сил напряжения в конструкции, распределение напряжений может быть материализовано через градиентную структуру, в которой плотность и ориентация пропорциональны величине и направленности сил напряжения. Для этого в данном случае поверхность оболочки была разделена на отдельные домены (клетки), площадь поперечного сечения каждой ячейки была пропорциональна величине основных напряжений, и ориентация клеток зависела от направления векторов главных напряжений (рис. 73). Затем прямоугольные ячейки были заменены плотно примыкающими друг к другу шестиугольниками, чтобы более равномерно распределить материал и избежать острых углов, которые могли бы привести к концентрации напряжений, порождая проблемы, связанные с бетоном. Для моделирования пористости по всей поверхности оболочки параметры основного напряжения на средней поверхности принимались за начало, после чего поверхность была разделена на области (клетки), которые были ориентированы вдоль основных траекторий напряжений от основания колонны снизу вверх. Центр клетки был определен как центр поры, в то время как край – как центр бетонной стойки. На втором этапе толщина стойки определялась пропорционально напряжению, действующему в обоих направлениях основного напряжения. Для того чтобы сохранить визуальное восприятие пористости на «материальном уровне» с визуально плавным изменением пористости, диаметры ячеек были ограничены диапазоном от 10 до 120 мм.

В силу ограничений в производстве, транспортировке и сборке невозможно было сделать так, чтобы конструкция была изготовлена как одна монолитная деталь или отлита на месте, поэтому конструкция павильона была сегментирована (рис. 74–76). Сегментация не должна была влиять на нагрузку и несущее поведение конструкции, и архитекторы пользовались непрерывными соединениями для

передачи нагрузки между сегментами (рис. 77). Поскольку данные соединения работают от статического трения, могут передаваться только сжимающие и сдвиговые напряжения. Для построения всех возможных фрикционных соединений в оболочке было использовано напряженное состояние несегментированной оболочки. В дополнение к контактным соединениям была введена система металлических крепежных элементов для обеспечения структурной безопасности во время сборки и представления избыточной системы контактных соединений. Оболочка была сегментирована по областям с низкой пористостью соответствующей высокой плотности, поскольку именно данные участки совпадают с высокими сжимающими силами и создают благоприятные условия для фрикционного соединения. В итоге макет сегментации привел к 69 сегментам с 18 уникальными геометрическими параметрами из-за четырехкратной симметричности оболочки. Результаты конструктивного анализа, проведенные с помощью плагина Millipede, были использованы в качестве исходных данных для создания функционально-градуированной пористости материала павильона. Кроме того, архитекторами бюро ILEK проводились детальные конструктивные анализы с использованием программы конечных элементов SOFISTIK 2016. Таким образом, допущения и методы проектирования постоянно подтверждались, наряду с процессом проектирования и по мере развития дизайна модель усложнялась.

Одной из основных целей сравнительного анализа было понять, как поведение структуры меняется от непрерывного состояния к пористому, затем превращаясь в сегментированную оболочку, и как эти изменения влияют на грузоподъемность. В итоге было проверено конечное предельное состояние, чтобы гарантировать структурную безопасность при всех возможных условиях нагрузки. Вначале была проанализирована сплошная оболочка для проверки результатов, полученных с помощью плагина Millipede. Проверка была проведена с учетом собственного веса конструкции и силы предварительного напряжения в окружном кабеле. Структурное поведение пористой оболочки сравнивалось со сплошной оболочкой для проверки того факта, что образование пористости не меняет несущей способности конструкции. Как сплошная, так и пористая оболочка были проанализированы в

зависимости от нагрузки, определяющей форму, которая является самонесущей с соответствующей силой предварительного напряжения. Сегментация оболочки структурной модели была создана для определения несущей способности конструкции.

Поскольку сетка модели павильона уже была сгенерирована в Rhinoceros, данная геометрия использовалась в качестве структурных элементов. Следовательно, участки сетки были переведены в SOFISTIK-код, чтобы задать элементам оболочки соответствующие физические свойства. Кроме того, расположение и ориентация границ сегментов были переданы для использования при моделировании узлов соединения конструкции. Для моделирования поведения соединения сегментов конструктивной модели были разработаны контактные соединения из металлических крепежных элементов между сегментами, которые были смоделированы как пружины, ориентированные в плоскости поверхности оболочки перпендикулярно граням сегмента. Коэффициент трения бетона составил 0,37 с дополнительным фактором безопасности, для того чтобы рассмотреть совместную работу материала и связать сжимающие силы с возможными сдвигающими усилиями по краю. Для моделирования возможных трещин и ударов была использована длина крайнего сегмента, чтобы получить растрескивающую нагрузку, которая использовалась для создания пружин. В представленных металлических креплениях установлен предел растрескивания для пружины, предполагающий минимальный размер стойки в условиях чистого растяжения нагрузки.

Процесс производства может привести к контактным соединениям, которые прерываются, но имеют точечный контакт. Для того чтобы предвидеть несущее поведение, был уменьшен процент контактных соединений. Для проверки гипотез, сделанных в процессе проектирования, было проведено сравнение двух структурных анализов, осуществленных в разных программах. Полученные диаграммы главных напряжений, максимальные и минимальные значения основного напряжения были похожи по величине и распределению. Влияние функционально-градиентной пористости на несущую способность было

исследовано путем сравнения структурных моделей. Анализы под действием собственного веса и соответствующей силы предварительного напряжения приводят к сходному принципу напряжения, а также к вертикальным отклонениям как по величине, так и по распределению с незначительными перераспределениями локальных напряжений.

Тем не менее значение вертикальной опоры снизилось примерно на 40%, этого можно было ожидать из-за снижения веса при введении пористости. Для исследования предельного состояния пористой сегментированной оболочки были проанализированы напряжения в крепежах. Первый подход состоял в том, чтобы уменьшить контактные соединения до 20%, включая все металлические крепления. Количество активированных крепежных деталей было дополнительно уменьшено до 50%, данное сокращение в конечном итоге привело к увеличению прогибов на 30–50% с максимальной вертикальной деформацией 0,6 мм.

В свойствах структуры павильона закладывались стратегии биомиметической оптимизации, которые были применены для того, чтобы продемонстрировать их актуальность в улучшении производительности несущих конструкций в строительстве. Примечательно, что принцип функциональной градации оказался подходящим при оптимизации конструкции павильона, а также продемонстрировал достаточную гибкость, чтобы свободно воплотить художественный замысел архитектора. Павильон был задуман как архитектурная презентация, при разработке концепции которой структурные, функциональные и эстетические требования были объединены для достижения намеченных визуальных эффектов. В свою очередь, дизайн павильона был разработан в итеративном вычислительном процессе, где материал и производственные характеристики были введены на концептуальный этап и в дальнейшем переведены в геометрические и конструктивные свойства павильона. Интеграция ограничений пористости и изготовление элементов может повлиять на поведение при нагрузке. Для того чтобы лучше понять влияние данных факторов для проверки первоначального предположения проекта, была проведена серия структурного анализа вдоль процесса проектирования. Сравнение напряженных состояний в анализируемых моделях из трех основных этапов

проектирования показало, что введение пористости, а также производственные и транспортные ограничения, такие как сегментация и местные механические соединения, не оказывают существенного влияния на несущее поведение конструкции. Следовательно, можно утверждать, что стратегии оптимизации действительно для структурного моделирования с учетом всех требований и ограничений проекта.

Как правило, принцип функциональной градации кажется достаточно надежным, чтобы подходить не только для структурной оптимизации, но и быть интегрированным в практику архитектурного проектирования для обеспечения концептуальных исследований встроенной структурной логикой. Можно сказать, что структурная оптимизация с целью экономии природных ресурсов становится средством проектирования новой архитектуры.

1.3.11. Создание 3D-печатной архитектуры в проекте DFAB House

Проект DFAB House является совместной работой исследователей и промышленных партнеров Федерального института технологий в Цюрихе (рис. 78). Здание DFAB было построено с использованием ряда передовых технологий, включая аддитивное производство, робототехнику и цифровое планирование, представляя собой прогрессивность в сфере 3D-печатной архитектуры. DFAB HOUSE – трехэтажное строение, расположенное в здании города Дюбендорфа (Швейцария), то есть дом находится на самой верхней платформе модульного здания для проведения исследований и инноваций (рис. 79). Одной из самых привлекательных особенностей DFAB HOUSE является сложный потолок, который был создан с использованием 3D-опалубки. Данная опалубка была изготовлена с использованием крупногабаритного песочного 3D-принтера от производителя Voxeljet, затем опалубка отливалась из бетона для создания потолочной плиты, которая весит всего лишь в два раза меньше, чем обычная плита тех же размеров. Снижение веса было достигнуто благодаря вычислительным инструментам,

которые позволили инженерам уменьшить толщину потолка при сохранении целостности конструкции.

Для создания потолка была использована шлифовальная 3D-машина, с помощью которой изготавливаются формовочные потолочные плиты высокого разрешения. Отдельные элементы затем заполнялись железобетоном сверхвысокой производительности и снабжались анкерами для последующего предварительного напряжения на участке строительства. Благодаря высокому разрешению принтера различные элементы, такие как освещение и акустика, уже могут быть встроены в элементы здания. Кроме того, свобода формы технологии позволяет конструктивно оптимизировать многофункциональные потолочные плиты. Так можно сэкономить значительное количество материала по сравнению со стандартными потолочными элементами. Smart Dynamic Casting – это технология непрерывного роботизированного скольжения, которая позволяет изготавливать несущие бетонные конструкции с переменным поперечным сечением без опалубки. Автоматизированный процесс состоит в том, что участок опалубки длиной 40 см непрерывно заполнен бетоном и постоянно тянется вверх. Специальные добавки гарантируют, что после выхода из сегмента опалубки бетон гидратируется только в той степени, в которой он выдерживает собственный вес и вес вышележащего бетона.

DFAB HOUSE также включает в себя изогнутую бетонную стену, которая была собрана роботом-строителем, а для того чтобы дополнить умный дом, в него был включен ряд ультрасовременных функций, таких как голосовые жалюзи, многоступенчатая система защиты от взлома и интеллектуальные приборы. Объединяя экспертов из Федерального института технологий в Цюрихе и ряда промышленных партнеров, DFAB HOUSE демонстрирует, как новые цифровые технологии могут применяться по-настоящему революционными способами для реализации современных идей. Важно отметить, что технологии, использованные при строительстве дома, сделали процесс строительства не только более эффективным, но и более устойчивым. Например, цифровые элементы дизайна,

такие как потолок и пол, создавались с учетом снижения веса и меньшего количества материала, чем их более обычные аналоги.

В доме также имеется ряд энергосберегающих функций, в том числе фотоэлектрические модули на крыше, которые обеспечивают примерно в 1,5 раза больше энергии, необходимой для дома, а также интеллектуальная система управления, которая координирует все энергопотребление и гарантирует исключение пиков нагрузки.

1.3.12. Внедрение нейронных сетей в работе цифрового художника Р. Анадол

Филармония в Лос-Анджелесе (концертный зал Уолта Диснея) сотрудничала с медиа-художником Рефиком Анадолом, чтобы исследовать технологии будущего. Используя алгоритмы машинного обучения, Анадол и его команда разработали уникальный подход к искусственному интеллекту для цифровых архивов филармонии – 45 терабайтов данных. Результатом явилась потрясающая визуализация проекта, который представлял собой недельную публичную художественную инсталляцию, спроецированную на внешнюю облицовку здания, и сезонную иммерсивную выставку в галерее Ира Гершвина (рис. 80).

Для того, чтобы сделать концертный зал Уолта Диснея «мечтой», Анадол использовал творческий, компьютеризированный «разум», для имитирования того, как люди мечтают, – обрабатывая воспоминания, формируя новую комбинацию образов и идей. Для этого Анадол работал с программой Artists and Machine Intelligence в Google Arts and Culture вместе с исследователем Parag K. Mital, чтобы применить машинный интеллект к цифровым архивам данных: 587 763 файла изображений, 1880 видеофайлов, 1483 метаданных файлов и 17 773 аудиофайлов (эквивалент 40 000 часов аудио из 16 471 спектакля) (рис. 81). Файлы были разделены на миллионы точек данных, которые затем были сгруппированы по сотням атрибутов с помощью глубоких нейронных сетей, способных как запоминать совокупность «воспоминаний» Л.А. Фила, так и создавать новые связи между ними. Такая «вселенная данных» является материалом Анадола, а искусственный

интеллект – его художественным сотрудником, вместе они генерируют что-то новое в изображении и звуке, пробуждая образное «сознание» концертного зала Уолта Диснея [36]. Результатом является радикальная визуализация первого столетия организации и исследование взаимодействия между искусством и технологиями, архитектурой и институциональной памятью.

Для воплощения в жизнь данного видения, Anadol использовал 42 крупномасштабных проектора с визуальным разрешением 50 К, 8-канальным звуком и высокой яркостью. Получающиеся в результате узоры, или «скульптуры данных», сформированные в результате интерпретации архивов компьютером, отобразились на волнистой внешней поверхности концертного зала из нержавеющей стали.

Сопутствующий саундтрек WDCN Dreams был создан на основе отобранного аудио из архивных записей Филармонии Лос-Анджелеса. Звукорежиссеры Роберт Томас и Керим Караоглу дополнили этот выбор, используя алгоритмы машинного обучения, чтобы найти похожие исполнения, создав уникальное исследование исторических аудиозаписей.

Посетитель может взаимодействовать с архивами через интерфейс с сенсорным экраном, освещающими вехи 100-летней истории Филармонии Лос-Анджелеса, углубляясь во всю вселенную данных, которой может манипулировать каждый посетитель галереи.

1.3.13. Отечественный опыт внедрения цифровых методов в архитектуру

Постоянное развитие современной отечественной архитектуры влечет за собой внедрение прогрессивного инструментария. Для того чтобы понять, какие именно методы (параметрические или генеративные) применяют российские архитекторы, необходимо проанализировать степень внедрения компьютерных технологий в процесс проектирования.

В качестве примера можно рассмотреть практику архитектурного бюро Nowadays Office, в котором архитекторы проекта Музея Московского Кремля

столкнулись с внедрением вычислительных инструментов в качестве метода моделирования геометрии сводов, раскладки плитки на поверхности двойной кривизны фасадов (рис. 82). Такой метод сокращает временные ресурсы, сделав модель параметрически изменяемой, облегчив процесс проектирования при дальнейших корректировках геометрии.

Стоит выделить российское бюро «Новое», в частности – проекты павильонов EXPO 2017 Astana (рис. 83). Архитекторы применили цифровые инструменты в качестве создания параметрической модели, что также привело к экономии времени и автоматизированному выводу чертежей из программы.

Кроме того, можно отметить деятельность консалтинговой компании Simplex Noise, которая, в отличие от других отечественных бюро, занимается всем, что связано с вычислительным проектированием. Способ работы Simplex Noise зависит от конкретных проектных задач: инструменты могут применяться локально на отдельных стадиях работы, или архитекторами создается единая вычислительная модель, которая соединяет в себе несколько стадий – 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 (рис. 84, 85).

Рассматривая цифровые инструменты как новый прием архитектурного творчества, стоит отметить, что некоторые архитектурные бюро используют вычислительное проектирование в качестве инструмента сокращения временных затрат на выполнение определенных шаблонных процессов (раскладка плитки) или в качестве моделирования сложной геометрии. То есть можно сказать, что в основном в России распространено применение параметрических инструментов.

Вычислительные модели состоят из совокупности агентов, которые взаимодействуют со своими соседями на основе близости. Именно совокупность взаимодействий агентов порождает последовательный сложный порядок [73]. Кроме того, цифровые технологии влияют на новые формы человеческого поведения. Например, в своей статье Бенджамин Браттон [120] раскрывает сложные

пространственные сопоставления, обеспечиваемые новыми методами пространственного отслеживания. Точно так же С.Е.В. Реас, который вместе с Беном Фраем отвечал за разработку Processing, использовал среды программирования с открытым исходным кодом для разработки многоагентных систем при создании новых произведений искусства.

В архитектуре наблюдается постоянный интерес к природе и биомимикрии. Поэтому неудивительно, что стаи все чаще используются как ссылочная метафора и организационный аналог в архитектурной риторике. Тем не менее архитектурное заимствование стайного интеллекта, разработанного новой группой архитекторов, в том числе Kokkugia и Biothing, является не попыткой имитировать природу, но *исследовать генерирующий потенциал* логики стаи. Проект призван охватить сложность и разработать методологию нелинейного проектирования, которая работает через многоагентные алгоритмы при создании прогрессивной архитектуры.

На самом деле внутренняя пространственная природа цифровых симуляций Крейга Рейнольда заключается в том, что логика роя оказала самое сильное влияние на генеративный архитектурный дизайн. Рейнольдс в общих чертах передал модель для имитации агентов Voids, которые лишены какого-либо централизованного контроля. Он полагался на индивидуальное поведение каждого агента и его локальное взаимодействие посредством трех основных операций: разделение, согласованность и сплоченность. Реалистичное поведение этих систем в виде стаи или роя стало мощной моделью для понимания децентрализованного характера коллективного поведения.

Разработка многоагентных стратегий проектирования в архитектуре является частью более широкого исследования генеративного дизайна, которое можно проследить через серию работ Питера Эйзенмана об автономии формы, одушевленные процессы Грега Линна, морфогенетическую парадигму, изложенную Джоном Фрейзером и Карлом Чу, и материальные вычисления Антони Гауди и Фрая Отто. В последнее время усилилась заинтересованность темой генеративной

архитектуры в силу применения алгоритмических методологий и распространения методов написания сценариев в архитектурном проектировании.

Исследования архитектурного дизайна на основе роевого интеллекта возникают уже почти десятилетие в экспериментальной практике. Однако разоблачение и распространение этой работы ускорилось за последние несколько лет благодаря академическим кругам, особенно преподавательской деятельности Алисы Андрасек, Сесила Балмонда, Пола Коутса, Эда Келлера, Нила Лича и Роланда Снукса в таких учреждениях, как Columbia GSAPP, Архитектурная Ассоциация, Университет Восточного Лондона, Институт архитектуры Южной Калифорнии, Университет Южной Калифорнии и Университет Пенсильвании.

Следует отметить, что алгоритмы на основе агентов, которые не задействуют сложные системы или нелинейный дизайн, также начинают находить свое применение в архитектуре за счет оптимизации, моделирования потоков людей и дизайна взаимодействия. Системы роевого интеллекта составляют основу для ряда алгоритмов оптимизации и поиска, таких как рой частиц и оптимизация колонии муравьев, которые были применены в рамках экологической оптимизации зданий [64]. В исследованиях, проведенных среди прочего Акселем Килианом и группой специалистов по моделированию в Foster + Partners, применялись системы с одним агентом для рационализации поверхностей сложной геометрии и ограждающих конструкций, в то время как многоагентные алгоритмы в течение ряда лет использовались такими специалистами, как Arup, в качестве инструмента моделирования выхода и движения в целях анализа [63].

Выводы по главе 1

Первая глава диссертационного исследования посвящена поиску и анализу методов генеративного и параметрического моделирования в контексте современного архитектурного формообразования. Поиск конкретных примеров привел к значительным выводам по классификации параметрических и генеративных методов [109]. В связи с этим сделаны следующие выводы:

1. Выявлены основные отличия параметрического и генеративного подхода в контексте цифрового архитектурного формообразования. Генеративное моделирование основано на компьютерном производстве вариантов форм, а параметрическое моделирование – на человеческой эстетике, которая воплощается в жизнь посредством компьютерного моделирования заранее разработанной архитектурной концепции.

2. Выявлены основные методы производства цифровых архитектурных концепций: 3D-печать, роботизированная рука, ЧПУ-станки.

3. Установлено, что архитектурные объекты невозможно построить без применения цифровых методов производства и моделирования (например, проекты бюро Zaha Hadid Architects: отель Morpheus в Китае, Центр Гейдара Алиева в Азербайджане).

4. Выявлены основные направления генеративных методов моделирования (генетические алгоритмы, топологические оптимизации, симуляции, агентные системы) [83].

5. Обнаружены актуальные тенденции современной цифровой архитектурной теории и практики, связанные с применением искусственного интеллекта.

ГЛАВА 2.

АНАЛИЗ ФОРМИРОВАНИЯ АРХИТЕКТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ МЕТОДОВ И ТЕНДЕНЦИЯ ИХ РАЗВИТИЯ В XXI ВЕКЕ

2.1. Современные факторы и предпосылки развития цифровых методов в архитектуре

Предпосылка любого общества основана на том, что не может быть комфортного существования человека без искусственно созданной среды. Именно искусственная среда – вместе с разработанными элементами – обеспечивает культурную эволюцию материальной природы, которая необходима человеку и посредством которой выгодный социальный порядок может сохраняться и накапливаться. В данном отношении сравним ДНК биологического происхождения и эволюцию развития. Человеческие поселения формируют и накапливают все более крупные и более дифференцированные пространственно-материальные структуры как скелет социальных образований, без которых не удалось бы достичь такого масштаба цивилизации. Более того, уровень взаимодействия разных социальных групп, столь важный для продуктивных способностей человека, не возник бы, не был бы настолько развит и продвинут без необходимой инфраструктуры [37].

То, что относится к началу культурной эволюции и, следовательно, к человеческой эволюции, само по себе применимо и сегодня в отношении задач развития, стоящих перед нами в настоящее время. Ведь архитектура – это не только выражение прогресса человечества, но и один из его ключевых факторов [8]. Стоит отметить, что фундаментальным первоначальным достижением человечества является не часто вызываемая защита от угрозы, а главным образом структурообразующее воплощение порядка.

Искусственная среда организует социальные процессы взаимодействия и играет роль в установлении и стабилизации общественного порядка. Это также включает владение, пространственное исключение и демаркацию (создание границ) посредством физических барьеров с соответствующими правами доступа.

Тем не менее искусственная среда включает в себя, прежде всего, пространственное распределение и функциональную конфигурацию типов взаимодействия или коммуникативных ситуаций с помощью семиологических кодов, причем относительное пространственное позиционирование также является средством кодирования. Искусственная среда структурирует социальные ситуации и ориентирует участников организованных социальных процессов, которые сами находят свое место.

Городские пространства, как внутренние, так и внешние, всегда являются спроектированными местами и всегда функционируют как форма общения: они информируют пользователей о типах взаимодействия и категории участников, которых они могут там ожидать, и, таким образом, дают начальное, рамочное определение ожидаемых ситуаций.

Соответственно хорошо расположенное и четко сформулированное пространство – это сообщение, а именно: приглашение принять участие в конкретной ситуации общения, которое, как и любое послание, может быть принято или отклонено. В том случае если послание принимается, оно сообщается путем входа в пространство, функционирующее как общая предпосылка всех участников и всей дальнейшей коммуникации, которая впоследствии происходит в данном контексте.

Адаптивно-инновационное продвижение этого необходимого структурирования, формирования и конфигурирования всей коммуникации является реальной социальной функцией архитектуры и всех дисциплин творчества, включая дизайн одежды, веб-дизайн и графический дизайн. Вместе с другими дисциплинами дизайна (включая городской дизайн, но не региональное или городское планирование) архитектура формирует единый дискурс, функциональную систему в смысле социолога Никласа Луманна (ср. Никлас Луманн, «Общество общества»), с исключительной универсальностью с точки зрения физиогномики общей застроенной среды. Школа Баухауза показала, насколько сильно дисциплина может изменить мир из одной точки; все без исключения коммуникации (включая телекоммуникации и текстовые

коммуникации, а именно веб-дизайн и графический дизайн) зависят от наших усилий по их упорядочению и структурированию, а также от выполнения работы в других функциональных системах (экономика, политика, правовая система, наука).

Например, дизайн одежды предоставляет нам варианты идентификации, дифференцированные в зависимости от ситуации. Эта графическая форма «визуального языка» социальных обозначений, как и искусственная среда, является феноменом человеческой жизни и как таковая, возможно, также является функционально необходимым аспектом эволюции человека. Графические обозначения (орнамент в широком смысле) также являются почти без исключения универсальным явлением всех созданных сред и артефактов в прошлом и настоящем.

2.2. Социально-философские исследования в контексте формирования новой цифровой архитектуры

В данном исследовании представлен анализ и прогноз потенциала цифровых методов как инструмента нового типа архитектурного формообразования в контексте возникновения информационно-сетевое общества. Важным является понимание и выявление взаимосвязи потребностей информационно-сетевое общества и возможностей цифровых методов. [9]

Для понимания потенциала современных инструментов архитектурного формообразования необходимо осознать картину мира и потребности нынешнего общества.

Следует отметить основные проблемы несоответствия социальных требований и антропогенной среды:

1. Популяция постоянно растет, а количество жилья и его габариты не предназначены для таких изменений.
2. Потребности человека постоянно меняются, в связи с чем возникает необходимость создания гибридных и многофункциональных пространств.

Современную архитектуру нужно рассматривать в контексте объектно-ориентированной онтологии, когда существует два вида восприятия: объектный и чувственный. Следовательно, архитектура, помимо выполнения основных функций (польза, прочность, красота), должна еще быть перформативной, то есть восприниматься как событие, постоянно адаптироваться под нужды посетителей [10]. Перформативность и адаптивность относятся ко всем фазам и стадиям проектирования. Даже этап поиска формы превращается в постоянное изменение вариантов, подбор наилучшего и самого оптимизированного за счет применения современных инструментов генеративного моделирования, например эволюционных алгоритмов. Важным является то, что при разработке архитектурного объекта задействуется все больше и больше смежных наук, таких как биология, программирование, социология, философия и другие [17].

Рассматривая текущую картину мира, необходимо отметить постоянное усложнение процессов из-за развития научно-технического прогресса. Однако важной задачей современного общества является сохранение природных ресурсов [18]. Проецируя философию генеративного метода проектирования на современную картину мира, можно провести параллель, которая основана на законе сохранения энергии и минимизации природных ресурсов [19].

2.2.1. Современная философская картина мира

Рассмотрим современную научную картину мира с точки зрения развития и внедрения цифровых методов в архитектурную деятельность. Основополагающим фактором, характеризующим картину мира, является научная революция. Аспект научной революции, который можно назвать идеей «непрерывной революции», предложил К. Поппер [58]. По мнению философа, научной может считаться только та теория, которая допускает принципиальную возможность своего опровержения.

В данном контексте необходимо рассмотреть принцип всеобщего эволюционизма, где доказано, что вселенная во всех своих проявлениях не может существовать без постоянного развития. В настоящее время основная работа ведется на молекулярно-генетическом уровне, благодаря чему создана искусственная теория

эволюции – синтез генетики и дарвинизма. Дарвинизм можно спроецировать на конкретные инструменты генеративного проектирования – эволюционные алгоритмы, которые помогают решать архитектурные задачи на основе заданных параметров и ограничений желаемого результата.

Современную картину мира сложно представить без синергетики как результата внедрения принципа универсального эволюционизма. В свою очередь, синергетику можно сравнить с таким инструментом генеративного моделирования, как агентные системы, основанные на самоорганизации природных процессов (рис. 86, 87).

2.2.2. Характеристики информационно-сетевого общества. Влияние социальных факторов на возникновение нового типа архитектурного формообразования

Наш мир находится в процессе структурных преобразований на протяжении более двух десятилетий. Данный процесс связан с появлением новой технологической парадигмы, основанной на информационных и коммуникационных технологиях, которые зародились в 1970-х годах и неравномерно распространились по всему миру. Общество развивает технологии в соответствии с нуждами, интересами и ценностями людей. Общество 5.0 – социально-экономическая и культурная стратегия развития общества, основанная на использовании цифровых технологий во всех сферах жизни. Прогрессивность и развитие являются важными, хотя и не единственными, условиями для возникновения новой формы социальной организации, базирующимися на работе сети, которая заключается в распространении связей во всех сферах деятельности на основе цифровизации. Такой процесс можно сравнить с ролью электричества и электрического двигателя в распространении организационных форм индустриального общества на основе новых технологий производства энергии и распределения.

Можно утверждать, что в настоящее время накопление богатства, знаний и власти в значительной степени зависит от способности общества пользоваться

результатами технологической системы, основанной на вычислительной технике и цифровых коммуникациях [20].

Основные стратегии “Общества 5.0”:

1. Технология обеспечивает инфраструктуру для управления материальными ресурсами с помощью информационной энергосистемы. Появление и развитие искусственного интеллекта и интернета вещей.

2. Связь между индивидами не зависит от времени или пространства, потому что узлы мобильны и перемещаются по сети.

3. Большая часть сетевого общества децентрализована, однако существуют центральные силы. Мощность, встроенная в сети, распространяется и координируется по горизонтали, сохраняя при этом вертикальный контроль над деятельностью общества. Решение сложных социальных проблем.

2.2.3. Дифференциация определений цифровой архитектуры: генеративное и параметрическое проектирование

Вначале необходимо дать определения параметрическому и генеративному проектированию. Параметрическое проектирование (рис. 88) является одним из современных цифровых методов, с помощью которого можно создавать сложные архитектурные формы на основе визуального программирования (рис. 89).

Таким образом, архитектурная форма полностью зависит от субъективного эстетического творческого метода мастера, а цифровые инструменты, в свою очередь, являются способом переноса геометрии в компьютерную среду для последующего выпуска проектной и рабочей документации. К параметрическому проектированию также относится создание форм, которые можно описать с помощью программного кода. Именно так программа выдает трехмерную модель по эскизам архитектора. Важным является то, что программируемая геометрия может быть скорректирована на любом из этапов (точки, линии, поверхность, объем), то есть форма постоянно обладает гибкими и изменяемыми свойствами [55].

С другой стороны, существует генеративное проектирование (рис. 90) как разновидность цифрового метода, технология которого заключается в том, что параметры формы задает архитектор, но при этом на выходе получается совершенно непредсказуемая геометрия. Инструменты генеративных методов, помимо алгоритмов, как и в параметрических методах, включают в себя еще и искусственный интеллект (машинное обучение), что дает возможность решения сложных творческих задач, выдавая новый результат [107]. Данный метод может решить различные задачи и облегчить работу архитектора. Однако в итоге получается, что архитектор больше не контролирует форму настолько, насколько возможно это делать в случае использования параметрических методов. Таким образом, выявляется основное технологическое отличие данных направлений: в случае параметрического метода архитектор использует цифровые инструменты для реализации своей идеи. А в случае генеративного проектирования архитектор полагается на результат компьютера, который работает по правилам, установленным человеком (рис. 91–93).

2.2.4. Спекулятивно-материалистические и реалистические направления современной философии

Объектно-ориентированная онтология Г. Хармана является социально-философским течением и в контексте искусства характеризуется двумя видами восприятия: объектным и чувственным [124]. С одной стороны, Харман указывает на недостаток феноменологии, стремящейся подчинить бытие объектов их отношению к человеку в процессе использования. С другой стороны, утверждая, что все абсолютно является объектами, философ разделяет их на реальные и чувственные, то есть интенциональные, тем самым отдает часть предпочтения феноменологическому подходу. Такая дифференциация позволяет выделить различие между объектно-ориентированной теорией Г. Хармана и акторно-сетевой концепцией Б. Латура. Необходимо понять, что объединение Г. Харманом в единый список предварительных правил метода объектно-ориентированной онтологии, а

также его имматериализм направлены не только на признание автономии сущностей единичных предметов, но и на прояснение природы и статуса объектов в социальной жизни. В данном случае объектное подразумевает, что предмет искусства воспринимается через призму его эстетических качеств. В свою очередь чувственное восприятие ориентировано на поиск чувств от объекта, получение дополнительного метафизического смысла. Таким образом, исходя из чувственного восприятия, создается философия того, что все предметы одинаковы вне зависимости от качеств, которыми обладают, ведь главное – это суть предмета [51]. Данную область познания можно спроецировать на архитектуру, сравнивая барокко и модернизм, где барокко воспринималось в качестве объектного типа, а за модернистскими формами скрывалась глубокая чувственность и смысл, основанный на изучении реальности. Следует отметить субъективность чувственного восприятия архитектурных объектов, поскольку каждый человек по-своему определяет смысловое содержание того или иного художественно-архитектурного шедевра.

Стоит отметить феноменологию в рамках современного философского течения XX века, где первичное восприятие несет онтологическое значение, оно является для Мерло-Понти базой, на которой вырастают все человеческие смыслы и значения, в том числе и эстетические. Поэтому человек является прежде всего субъектом восприятия, а его тело – тем общим инструментом понимания мира, который воспринимает человек [32].

2.2.5. Принципы Квентина Мейясу в критике корреляционизма

Первый принцип связан с критическим отношением к утверждению, что корреляция (соотношение) возможна только между мышлением и бытием и не более, то есть в сфере предметного мира соотношение между объектами невозможно. Второй принцип определяет понятие контингентности, под которой Мейясу подразумевает чистую «возможность-вещи-быть-другой», которую не следует путать с простой случайностью и преходящими свойствами.

2.2.6. Акторно-сетевая теория Бруно Латура

Данное направление представляет собой метод социально-аналитического исследования науки и технологий, рассматривающий все объекты: артефакты, технические комплексы, животных и пр. – в качестве действующих единиц социальных отношений [108]. Такой подход называется материально-семиотическим, ибо он предусматривает описание материальных отношений между вещами, и семиотическим – между понятийными единицами. Производство научных знаний, с точки зрения сторонников акторно-сетевой теории, необъяснимо ни посредством природы, ни посредством культуры.

2.2.7. Перформативное содержание архитектуры

Данная теория позволяет описывать здание или среду как движение, изменение во времени, становление [108]. В современной тенденции это прочитывается таким образом, что архитектура стремится принять время и среду как важнейшие основания своей деятельности, тем самым утверждая перформативность своей природы.

2.2.8. Влияние творческих методов Захи Хадид и социально-философских исследований Патрика Шумахера на формирование нового архитектурного стиля "параметризм"

В первую очередь необходимо понять истоки творческого метода Захи Хадид, так как архитектура и национальность данного мастера воплощают в себе смесь двух культур: европейской и восточной [47]. С точки зрения европейского влияния на архитектуру Захи Хадид можно вспомнить советского художника-авангардиста Казимира Малевича, который первым расширил границы, открыв миру модернизм и беспредметное искусство. Модернизм является олицетворением глубокой чувственности, основанной на изучении реальности, что отражается в направлении объектно-ориентированной онтологии. С другой стороны, в плавных линиях проектов Захи Хадид прослеживается восточная культура, которая основана на

любви к природным формам, водным поверхностям и влиянию физических процессов на органические объекты (рис. 94). В данном контексте важно подчеркнуть влияние арабо-мусульманской эстетики на творчество Захи Хадид. Представители восточной перипатетики писали о красоте мироздания, которая иногда толковалась в пифагорейском духе и усматривалась в гармонии космоса, пластических форм, цветов и звуков. Высшим критерием оценки произведений художника было его правдоподобие. Высоко ценилось искусство каллиграфии. Арабо-мусульманская эстетика оказала влияние на мировую эстетику. Можно сказать, творческий метод Захи Хадид основан на симбиозе двух культур – европейской и арабской, где первая подразумевает использование советского конструктивизма и авангарда, а вторая олицетворяет внедрение математически-природных форм и каллиграфии при создании образов зданий (рис. 95).

Необходимо рассмотреть некоторые философские исследования Патрика Шумахера и оценить их влияние на возникновение нового архитектурного стиля (рис. 96). В первую очередь следует дать определение понятию «социальная дифференциация» – коммуникативное достижение искусственной среды и ее элементов, которые постоянно усложняются с увеличением степени свободы среди всех сторон, вовлеченных в процесс городского развития.

Параметризм и сопутствующие методы данного направления в контексте современных социально-философских требований являются условиями формообразования и, в отличие от модернизма и устаревших ретро-стилей, отвечают сложным задачам современности (рис. 97).

Искусственная среда упорядочивает процессы социального взаимодействия и оказывает влияние на создание и стабилизацию общественного строя.

Понятие "постфордизм" означает экономическую динамизацию и концентрацию в городах, которая не может быть организована с использованием принципов современного городского планирования (разделение, специализация, повторение) и не может быть адекватно сформулирована монотонными средствами современной архитектуры [65]. Параметризм разработал свои методы и адаптивно развернул формальное разнообразие в контексте новых условий, в отличие от

модернизма и устаревших ретро-стилей. Таким образом, данное направление готово к решению проблем современного общества. Городское развитие может расцвести под знаменем параметризма, образуя новую органическую идентичность, чтобы избежать визуального хаоса последних десятилетий, который возник из устаревшей архитектуры с противоречивыми коммуникативными возможностями. Здесь сложность процесса разработки превосходит компетенцию и возможности централизованного государственного управления. В этом смысле так называемая неолиберальная революция была корректировкой потенциала постфордистской экономики и породила производительные силы, которые были доступны только в рыночных рамках. Городское планирование изменилось недостаточно радикально, поэтому оно замедляло процессы развития, подобно слабой реформистской политике [114].

Основной технологически обусловленный вектор современного социально-экономического развития можно также описать под понятием постфордистского сетевого общества.

В результате новая программа параметризма ориентирована на будущее архитектуры и действий развития общества, опираясь на два основных аспекта:

1. Общее распространение параметризма как архитектурного стиля эпохи XXI века и, следовательно, как окончательного вклада архитектуры в развитие постфордистского сетевого общества;

2. Программа новой архитектурной семиологии, основанная на коммуникативном потенциале искусственной среды, которая связывается сложным и динамичным постфордистскими социальными структурами и процессами взаимодействия.

Впоследствии архитекторы с помощью данных параметрическо-семиологических методов будут пространственно организовывать и формулировать порядок предложений со стороны заказчика.

Подводя общую черту, необходимо отметить важность влияния потребностей информационно-сетевого общества на формирование новых архитектурных структур и философских течений. Современное искусство создает новое, порождая

объекты и связи, которые помогают воспринимать не только эстетические эффекты, но и замечать метафизику художественных произведений. Важным и основополагающим в современной архитектуре является то, что цифровые технологии дают возможность получать непредсказуемую архитектурную форму при задании параметров и использовании принципов машинного обучения.

На данный момент существует проблема взаимодействия архитектурной эстетики, композиционных приемов и результата, полученного с помощью компьютера [84].

2.3. Направления развития и классификация цифровых методов

Необходимо выделить два основных направления цифровых методов: параметрические и генеративные (рис. 98). Параметрические методы проектирования олицетворяют частичное внедрение компьютерных инструментов, например, для моделирования сложной формы, создание автоматизированной модели с изменяемыми параметрами. То есть архитектор создает эстетику формы, а дальнейшие технические моменты решает компьютер, сохраняя первоначальную идею архитектора. В данном случае компьютерные инструменты помогают сделать гибкую параметрическую модель, которую можно изменить на любом этапе геометрического кода (точки, линии, поверхность, объем).

С другой стороны, существуют генеративные методы, которые помогают решать поставленные архитектурные задачи путем создания большого количества вариантов. Таким образом, эстетика данной формы подчинена компьютерным генерациям, а архитектор контролирует правильность исходных данных (технического задания) и непосредственную релевантность компьютерного кода.

Кроме того, стоит выделить основные направления параметрических и генеративных методов. Параметрические методы связаны с моделированием и автоматизацией объемной идеи архитектора [21]. Следовательно, можно выделить инструменты, связанные с построением фасада, целого объема здания. Данные инструменты представляют собой визуальный язык программирования, с помощью которого можно моделировать форму в цифровой среде программы Rhinoceros.

Алгоритмы построения имеют непосредственную отсылку к математическим формулам и поэтапной логике формирования объема в пространстве. Можно выделить две основные проблемы, связанные с переносом бумажного эскиза архитектора в цифровую среду:

1. Обеспечение переноса архитектурной идеи (с бумажного носителя или макета) в наиболее точной форме. В данном случае может помочь создание макета и последующие точные обмеры пропорций, габаритов, вплоть до 3D-сканирования физической модели. Таким образом, перенос идеи в цифровую среду не повлечет за собой искажение геометрической действительности.

2. Обеспечение подбора необходимых компьютерных алгоритмов для точного и наиболее параметризованного моделирования необходимого объема. В данном случае архитекторы обращаются к математическим скриптам, описывающим поверхность (математический метод) [78]. Например, для создания сложного фасада с градуированными отверстиями применяется аттракторный метод, основанный на том, что существует некая точка в пространстве, и чем дальше ее расположение от фасада, тем больше будет окно, соответственно, чем ближе эта точка к фасаду, тем меньше будут габариты окна. Таким образом, получается градуированный фасад, следовательно, данный метод подчиняется зависимостям.

С другой стороны, можно выделить основные направления генеративного метода, который является наиболее перспективным и новаторским по своей сути. Вначале необходимо понять, что генеративный метод отчасти представляет собой процесс машинного обучения, который включает в себя объем больших данных. Важно подчеркнуть три основных направления цифровых методов:

- 1) агентные системы;
- 2) эволюционные алгоритмы;
- 3) оптимизации.

Данные методы являются наиболее актуальными с точки зрения их внедрения в процесс архитектурного формообразования и проектирования. Кроме того, каждый инструмент можно использовать в качестве решения определенных задач [23]. Например, оптимизации применяются для готового объема (разработанного

архитектором), на выходе программа выдает геометрию, которая является наиболее правильной с точки зрения приложенных нагрузок, опор и применяемого материала.

Эволюционные алгоритмы применяются для решения определенных задач, в итоге выдавая большое количество вариантов, удовлетворяющих заданным параметрам исходных данных [129].

Агентные системы, например, могут применяться в качестве инструмента поиска формы на основе природных самоорганизаций. В итоге получается, что генеративные системы делятся на основные направления, которые, подразделяются на подгруппы. Агентные системы могут основываться на различных видах природного интеллекта [65]. Самыми распространенными видами являются стигмергия (процесс самоорганизации насекомых) и роевой интеллект (процесс самоорганизации некоторых птиц и рыб).

Эволюционные алгоритмы основаны на классическом дарвинизме и популяционной генетике, которые, подразумевают генетические мутации и механизм эволюции (естественный отбор).

Важно отметить, что все вышеперечисленные подгруппы могут являться отдельными программными инструментами, требующими предварительного анализа данных.

2.4. Внедрение цифровых методов на различных этапах архитектурного проектирования

2.4.1. Аналитика и разработка архитектурной концепции

На данном этапе анализа важным является структурирование и оценка влияния цифровых методов на стадию аналитики и создание концепции архитектурного проекта [22].

Рассматривая этап сбора данных и аналитики, можно выделить следующие инструменты анализа:

1. Хронотоп – платформа компании Nabadatum для анализа городских данных, которая отслеживает информацию в режиме реального времени и с традиционным ретроспективным анализом временных рядов (рис. 99, 100, 101).

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

Стадия поиска архитектурной формы и создания первичных чертежей является одним из самых важных этапов проекта. Здесь стоит выделить различные категории инструментов поиска формы:

- генерация архитектурной формы на основе климатических и геологических особенностей участка проектирования (рис. 102);

- генерация архитектурной формы на основе заданных правил и эволюционных алгоритмов (рис. 103);

- формирование архитектурного объема путем внедрения физических симуляций (рис. 104);

- первичное конструктивное совершенствование разработанной архитектурной формы (рис. 105);

- алгоритмизация и параметризация геометрии, разработанной архитектором [40].

Таким образом, поиск формы может сопровождаться любым из вышеперечисленных способов или их сочетанием. Цифровые инструменты помогают создавать гибкую форму моделирования архитектурных объектов (рис. 134, рис. 135) [43].

2.4.2. Проектирование и разработка рабочей документации

Необходимо оценить потенциал цифровых методов с точки зрения разработки проектной и рабочей документации. Данные этапы связаны с непосредственной детализацией проекта, в связи с чем можно выделить некоторые варианты применения алгоритмических инструментов.

Проектная документация:

- создание BIM-модели здания (рис. 106);
- вторая итерация анализа инсоляции, акустики, конструктивных характеристик здания;
- алгоритмическое моделирование элементов здания (деталей фасада) (рис. 107).

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.

Таким образом, можно сказать, что внедрение цифровых методов во время разработки рабочей и проектной документации помогает экономить время, делая архитектурную модель здания более гибкой и автоматизированной.

2.4.3 Строительство, цифровое производство

На данном этапе стоит выделить выпуск рабочей документации и процесс цифрового производства, особенно если говорить о сложной форме и уникальной геометрии деталей [41].

Раньше строительство зданий основывалось на массовом выпуске элементов конструкции (типовые блоки стен, перекрытий, окон, дверей), таким образом общество получало типовую, серийную застройку. Сейчас же, с возникновением новых технологий, можно выпускать уникальные детали, а производство таких элементов не будет превышать стоимость выпуска элементов массового (конвейерного) производства [42]. Следовательно, при создании детализированной геометрии здания в среде компьютерных программ впоследствии можно получить чертежи всех уникальных деталей путем внедрения инструментов цифрового производства (рис. 108). Для этого необходимо подготовить цифровую модель к

процессу производства – проверить на наличие пустот и на правильность моделирования геометрии (рис. 109). Программа, в которой была создана геометрия (Rhinceros, Grasshopper), дает возможность запускать процесс производства. Существует множество различных инструментов, чтобы перенести геометрию из компьютерной среды в физическую: роботизированное производство, 3D-печать, ЧПУ-станок (рис. 110) и т.д. Помимо создания объемов, необходимо помнить о физических симуляциях (рис. 111) и экспериментах, чтобы на моделях уменьшенного масштаба или на деталях увидеть работу элемента и конструкции в целом, для того чтобы определить релевантность и способность структуры к дальнейшей эксплуатации (рис. 112, 113). Таким образом, стоит отметить важность как цифровых, так и физических тестов в силу того, что в некоторых случаях можно выявить значительные отличия в рамках оценки конструктивного потенциала формы.

Выводы по главе 2

Вторая глава посвящена анализу и классификации различных методов генеративного проектирования с опорой на практическую целесообразность применения таких инструментов. Исходя из проведенного анализа и оценки влияния генеративных методов на архитектурное формообразование, можно сделать следующие выводы:

1. Выявлены предпосылки развития цифровых методов моделирования, которые базируются на новых потребностях современного общества и тенденциях следования бионической эстетике.

2. Выявлено основное направление параметрических методов архитектурного формообразования: алгоритмическое моделирование на основе аттракторных систем и математических формул.

3. Разработана классификация направлений параметрических и генеративных методов.

4. Выявлена роль искусственного интеллекта при разработке архитектурных концепций и анализе современных архитектурных объектов, а также

проанализирован потенциал применения машинного обучения в контексте поиска оптимальной архитектурной формы с точки зрения технологических (утилитарных) и композиционных аспектов.

5. Разработана классификация способов применения инструментов генеративных методов на различных стадиях проектирования (концепция, проектная документация, рабочая документация, эксплуатация). Основным выводом данной классификации является то, что на стадии концепции архитекторы используют широкий спектр различных инструментов генеративного проектирования (от физических симуляций и генетических алгоритмов до процесса выпуска чертежей для цифрового производства), а на стадиях проектной и рабочей документации весь спектр генеративных методов сужается до инструментов, которые помогают оптимизировать процесс выпуска чертежей, сократив рутинные процессы. Вывод является очевидным в силу того, что на стадии концепции архитектор ищет форму, используя все доступные творческие средства, а на стадии проектной и рабочей документации необходимо решить более утилитарные вопросы (рис. 135).

ГЛАВА 3.

МЕТОДЫ ГЕНЕРАТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОЕКТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ

3.1. Метод генетических алгоритмов генеративного моделирования

Генетические алгоритмы отвечают за расформирование объема на основе заданных правил и ограничений (рис. 118). В случае проектирования общественного центра в городе Истре (Московская область) была создана иерархия значимости правил. На первом месте стояло правило ориентации будущего здания на Ново-Иерусалимский монастырь, которое одновременно должно было нести функцию моста, соединяющего два берега реки Истры. После внесения данных в алгоритм необходимо было задать зависимости и принцип работы генетических алгоритмов. Основная зависимость заключалась в обеспечении минимального расстояния до храма и относительной гибкости (аморфности) формообразования. Таким образом, целью являлись исходные правила, а отправной точкой был прямоугольный объем, подвергнутый модификациям алгоритма. Работа алгоритма выдала несколько вариантов, оптимизированных под заданные правила и ограничения (рис. 119).

Рассмотрение такого вида генеративных методов, как топологические оптимизации, может сильно повлиять на финальную форму будущей концепции здания. Это происходит в ходе процессов удаления лишнего материала, который не участвует в работе конструкции (рис. 120). Кроме того, топологические оптимизации могут сгладить форму в некоторых местах, придав ей аморфность и плавность в силу определенных климатических адаптаций. Следовательно, если форма была угловатой и прямой, то существует большая доля вероятности, что такая геометрия кардинально изменится. На данном этапе возникает вопрос об эстетическом вкладе архитектора в финальную форму. Таким образом, авторство начальной геометрии и заданные параметры принадлежат архитектору, а конечный объем сгенерирован компьютером. Для полного понимания данной проблемы стоит привести в пример проект общественного центра в городе Истре, где в качестве

исходного объема был взят прямоугольник, который впоследствии поменял контур плана и объем в целом для того, чтобы удовлетворить конструктивные, климатические и социальные факторы (рис. 121).

С другой стороны, в раздел генеративного проектирования входит метод агентных систем, который основывается на принципах самоорганизации различных органических существ (рис. 122, 123). Ярким примером агентных систем являются человеческие потоки, которые имеют свойство сосредотачиваться и двигаться к единой цели (например, переход в метро) и рассредотачиваться (выход из метро). В данном примере самоорганизация зависит от ограждающих стен и препятствий в пространстве на пути к цели. Однако если рассматривать природные самоорганизации элементов живой природы (стая скворцов), то можно заметить, что основополагающим фактором самоорганизующихся движений является генетически заложенный материал, то есть на уровне инстинктов птицы понимают, как нужно себя вести при виде еды или опасности, а именно: держаться вместе на определенном расстоянии и в соответствующей последовательности. Данные принципы были взяты в качестве инструмента генерации общественного центра в городе Истре (рис. 124, 125).

За основу процесса формообразования были взяты исходные правила, которые формировали ограничения у алгоритма. Таким образом, в свою очередь, существующие крупномерные деревья являлись препятствием в рамках алгоритмического кода, объектом притяжения являлся Ново-Иерусалимский монастырь, само здание которого должно было выполнять функцию моста через реку Истра. Следовательно, для запуска системы агентных самоорганизаций был использован компонент Physarealm (рис. 126), который в реальности является одним из самых простых эукариотических микроорганизмов (рис. 127). Его использовали в качестве модельного организма для многих исследований, включающих амебоидное движение и подвижность клеток. Английский ученый Джефф Джонс опубликовал статью «От формирования шаблона до расчета материала». [89] В этой книге он принял подход синтеза и мобильную мультиагентную систему с очень

простым индивидуальным поведением. Представленная модель воспроизводит биологическое поведение *Physarum*: формирование, рост и минимизацию транспортных сетей.

Применение данного инструмента позволило сгенерировать общественный центр в городе Истре, отвечающий основным требованиям, предъявляемым к концепции здания.

3.2. Метод топологических оптимизаций генеративного моделирования

Серия экспериментальных моделей как новый вид цифрового творческого метода архитектора

Цель топологических оптимизаций заключается в том, чтобы максимально оптимизировать геометрическую форму с точки зрения конструктива, материала, внутренних напряжений. В ходе эксперимента была разработана серия форм, из которых удалили лишний материал, не несущий никакой нагрузки.

Вначале для работы программы необходимо было задать исходные данные: геометрическое тело, нагрузка (количество), опоры, материал. Вследствие ввода данных создается скрипт (код), с помощью которого задаются зависимости и связи по отношению к главному инструменту оптимизаций. На выходе, кроме оптимизированного изображения, можно выбрать отображение линий стресса, изгибающих моментов, деформации, текучесть [49].

Таким образом, в результате были получены новые структуры, представляющие собой элементы новой цифровой эстетики. Для оценки полного спектра инструмента топологической оптимизации были использованы следующие геометрические тела: полусфера, цилиндр, изогнутая плоскость, гиперболоид и различные вариации данных форм. Следовательно, экспериментальным путем удалось получить зависимости сокращения материала в соответствии с изначальным объемом (рис. 128, 129).

Также эксперименты проводились над плоскими дисками (рис. 130, 131). В ходе работы за основу был выбран прямоугольный стальной диск с габаритами 1 м на 1,2 м, который подвергался различной нагрузке и ее расположению. Следовательно, каждое новое расположение нагрузки и опоры давало новый оптимизированный рисунок на диске, который показывал участки диска с наибольшим напряжением, то есть те участки, которые выполняют основную несущую функцию. Участки напряжения менялись в зависимости от количественных показателей нагрузки и от ее расположения. Таким образом, на выходе были получены различные вариации линий напряжения дисков. Отличительная черта линий напряжения – ветвистость, плавность, которая постепенно сужается от опоры к нагрузке (рис. 132, 133). В данном случае геометрию диска можно косвенно соотнести с объемом межэтажного перекрытия. Таким образом, в дальнейшем можно армировать только те участки, в которых есть напряжение, остальное можно залить бетоном, что внесет экономический потенциал в производство таких элементов конструкции.

3.3. Метод компьютерных симуляций генеративного моделирования

В последние десятилетия архитекторы обратились к компьютерному моделированию в надежде спроектировать более функциональные, устойчивые и привлекательные здания. Важно рассматривать здания не просто как статические конструкции, а скорее, как сложные динамические системы, управляемые в высшей степени стохастическими элементами, включая погоду и поведение человека.

Было разработано множество инструментов симуляции для моделирования конкретных факторов, влияющих на здание, таких как термодинамика, дневной свет, поведение толпы и структурная целостность при внутренних и внешних нагрузках. Многие факторы, влияющие на здания, взаимозависимы, они часто анализируются изолированно из-за вариаций программного обеспечения.

Системный подход, сочетающий визуальное программирование с современными методами моделирования и симуляциями, может помочь

архитекторам и ученым-строителям объединить свой опыт для создания интегрированных сложных системных моделей, поддерживающих новые парадигмы, такие как генеративное проектирование.

3.4. Метод агентных систем генеративного моделирования

Сложная воздушная хореография, которая разворачивается в движении стаи птиц, демонстрирует возникновение коллективного поведения. В основе последовательной элегантности и подвижности стаи лежит очень сложная форма интеллекта роя, основанная на локальном взаимодействии отдельных агентов, которое приводит к сложному глобальному поведению. Финальный порядок не навязывается сверху, а возникает в результате восходящего взаимодействия агентов в стае [49]. Эта модель сложности все чаще понимается как логика, лежащая в основе столь разнообразных систем, как стаи птиц, колонии насекомых, социальные сети людей и даже деятельность города. Такой распределенный способ формирования также начал выступать в качестве методологической и концептуальной основы для множества генеративных стратегий архитектурного проектирования [33].

Внутри стаи нет единственной ведущей птицы, но вместо этого каждая птица следует набору относительно простых правил, таких как «Сохраняйте направление и скорость соседних птиц» и «Сохраняйте определенное расстояние от птицы, соседей». Из этих простых правил возникает сложное групповое поведение. Целое больше, чем сумма его частей. Отдельные птицы не осознают общую динамику группы, хотя для внешнего наблюдателя поведение стаи становится ясно идентифицируемой сущностью. Внутри любой популяции индивидуальных агентов можно увидеть появление определенных общих моделей поведения.

Хотя стайное поведение само по себе не ново, стайный интеллект появился недавно как общая теория для описания коллективного поведения. Из логики стаи возникает новый теоретический подход к описанию формирования порядка в самых разных дисциплинах, таких как биология, инженерия, философия, экономика,

социология, робототехника, информатика, городское планирование, архитектура и искусство. Эта парадигма представляет собой сдвиг в понимании от концептуализации формы и организации на макроуровне к рассмотрению взаимодействия систем более низкого уровня, которые приводят к мировому порядку. Эти системы генерируют паттерны поведения, но не узоры, застывшие в одном выражении, а модели поведения, основанные на динамической адаптации [38]. Постоянно мутирующие, возникающие системы, основанные на взаимодействии, информационных петлях обратной связи и распределенном управлении, бросают вызов традиционному механизму предопределенного контроля и сосредотачиваются на своей саморегулирующейся адаптивной способности.

История исследований стайного интеллекта, возможно, столь же сложна, как и действия самой стаи. Не существует единой линии, которую можно было бы проследить, а скорее, существует множество разнообразных траекторий мысли в рамках ряда различных дисциплин. Некоторые из этих индивидуальных траекторий восходят к философам античности, таким как Аристотель. Однако в последние десятилетия эти траектории начали формировать связное поле с более или менее узнаваемой идентичностью, поскольку стайный интеллект стал важной областью исследований в рамках изучения сложных процессов и систем. Если кто-то оказал большее влияние на развитие этой области, чем другие, то это Джон Холланд – первый доктор в области компьютерных наук и изобретатель генетического алгоритма. Д. Холланд в значительной степени ответствен за создание области сложных адаптивных систем, которые работают через взаимодействие простых агентов, способных развиваться в ответ на меняющийся контекст. В сочетании с работами Стюарта Кауфмана и Кристофера Лэнгтона это заложило основу для развития исследований стайного интеллекта Холландом. Кауфман и Лэнгтон были важными фигурами в Институте Санта-Фе, который был основан в Нью-Мексико в 1984 году как междисциплинарный исследовательский центр. Институт Санта-Фе сыграл ключевую роль в определении и развитии теорий сложности, выступая в качестве катализатора инновационного мышления в области стайного интеллекта.

Ключевые фигуры в развитии роевого (стайного) интеллекта, Марко Дориго, Гай Тераулаз и Эрик Бонабо, обращали внимание на самоорганизующиеся системы в природе как на модели для понимания других структур поведения. В своей основополагающей книге о роевом интеллекте, изучив сетевые операции колоний муравьев, исследователи показали, что можно начать понимать сложные взаимодействия в групповом поведении. Кевин Келли утверждал, что сложная природа многих систем – от клеточного масштаба до формирования культурных структур – распространяется на социальные, политические и даже экономические системы [39].

Можно обнаружить дальнейшее слияние идей, поскольку мыслители, находящиеся под влиянием делезианской традиции «множественности», такие как Мануэль де Ланда, также попали под влияние идей, исходящих из Института Санта-Фе. Хотя мы, возможно, могли бы задаться вопросом, был ли сам Делёз таким последовательным научным мыслителем, как мог бы утверждать де Ланда, ясно, что мышление Делёза тесно связано с работой, проводимой в междисциплинарных научно-исследовательских институтах, например, в MIT Media Lab и Институте Санта-Фе. По мере того как де Ланда начал определять позицию, вытекающую из его исследования работ Делёза, он основал теорию Нового материализма, в которой сходятся воедино концепции как множественности Делёза, так и самоорганизации. Центральным в Новом материализме является нелинейная самоорганизация материи, проблема, параллельная работе Сесила Балмонда, и его разработка методологий нелинейного проектирования в рамках подразделения Advanced Geometry Unit, созданного им в Arup [59]. В некоторой степени понимание сложностей поведения стаи, в частности, их инструментализация в качестве генеративного устройства, стало возможным благодаря развитию новых вычислительных методов. Важный инструмент в изучении и применении стайного интеллекта – это многоагентные модели. В рамках этого подхода самоорганизованное глобальное проектное направление возникает через согласование набора локальных проектных решений или поведения, закодированных в индивидуальных агентах, которые взаимодействуют внутри стаи.

Таким образом, эти методологии представляют собой переход от проектирования объекта к проектированию поведения, лежащего в основе его формирования.

Такой поведенческий подход радикально меняет характер процесса проектирования. Однако для того, чтобы логика стаи оказала глубокое влияние на архитектуру, она должна не только изменить процесс проектирования, но и, что более важно, оказать фундаментальное влияние на природу результирующей архитектуры. Актуальность такой работы зависит от способности этих процессов создавать критическую разницу в формировании пространственных, формальных и организационных качеств архитектуры. Исходя из редуктивного порядка нисходящих методологий, крайне важно понять это различие в архитектурном результате – не как наложение паттерна или чисто геометрическое упражнение, а как целостный процесс формирования и развертывания архитектурного замысла. Следовательно, альтернативные нелинейные методологии должны быть связаны со строгими архитектурными проблемами, а их результаты должны подвергаться эффективной критике.

Инструментализация логики стаи, продемонстрированная в работе новых практик и академических институтов, работает повсеместно. Широкий спектр инструмента включает в себя генерацию абстрактных узоров, формирование нелинейных структурных сетей, самоорганизацию городских систем и генерацию формы и орнамента. Такой набор функций предлагает раскрыть потенциал и ограничения многоагентных моделей проектирования.

Способность проектировать убедительные здания с помощью логики стаи остается открытым вопросом. Большая часть проектов, представленных в современной архитектурной практике (задействующая процессы стайного интеллекта), работает на уровне протоархитектуры – как эксперимент в организации, форме или структуре. При превращении этих экспериментов в архитектурные предложения наиболее уязвимыми являются проекты, в которых формирование сложного порядка разрушается нормализующим эффектом последовательности линейных операций. Несмотря на то, что ни один из таких

сложных проектов не был реализован, очевидно, что существует растущий импульс для применения многоагентных стратегий проектирования в сфере строительства.

Предлагается радикальная методология проектирования, основанная на нелинейных алгоритмических процессах формирования, а не на оперировании посредством параметрического манипулирования формой. Зарождающееся присвоение архитектурой логики стаи не только предлагает мощную стратегию генеративного дизайна, но также ставит под сомнение многие линейные предпосылки, которые подчеркивают нормативное архитектурное проектирование. И все же корни этого нового подхода лежат в самых древних системах: логика стаи традиционных городских форм, таких как здания Марракеша, фавел в Южной Америке и хутунов в Китае, и, прежде всего, логика роя самой природы. Роевой интеллект произвел революцию во многих других дисциплинах.

Вычислительные агенты – это программные объекты, которые могут ощущать свою среду и воздействовать на нее. Во многих случаях сама среда состоит из других вычислительных процессов, но она также может включать людей. Применяются инструменты искусственного интеллекта разного уровня сложности, чтобы наделить агентов способностью рассуждать о том, что они чувствуют, и решать, как действовать. Эти способности к рассуждению могут варьироваться от простых реактивных способностей (если стимул X ощущается, то воспользуйтесь Y) до более сложных, включающих ожидание будущих стимулов и планирование адекватных реакций. Когда взаимодействуют многие агенты и когда их отдельные действия должны быть скоординированы для достижения общей цели, среда становится примером распределенного искусственного интеллекта, термина, почти синонимичного термину «многоагентные системы». Многоагентные системы имеют множество приложений: покупка и продажа в Интернете как часть автоматизированной электронной коммерции; компьютерные интерфейсы, которые могут узнать о привычке человека-пользователя для облегчения взаимодействия; децентрализованные системы управления трафиком.

Простейшие мультиагентные системы, используемые в социальных науках, такие как моделирование Sugarscape, иллюстрируют две основные характеристики,

которыми программные объекты должны обладать, чтобы быть частью модели социальных явлений: они должны быть воплощены и расположены в пространстве. В случае с Sugarscape воплощение исходит из того, что агентам предоставляется имитация метаболизма: программные объекты, которые появляются на экране в виде не более чем движущихся цветных квадратов, должны находить и потреблять имитацию пищи, чтобы выжить. Агенты расположены в пространстве, населяя двумерную сетку, определяющую пути, по которым они могут перемещаться, расположение запасов пищи и расстояния, за пределами которых они не могут ощущать присутствие пищи или других агентов. Sugarscape можно рассматривать как комбинацию объектно-ориентированного программирования и клеточных автоматов [32].

Объектно-ориентированное программирование – это парадигма программного обеспечения, которая порывает с централизованным контролем старых компьютерных языков, таких как Фортран, Паскаль или С. В программах, написанных на этих языках, обычно есть мастер-программа, которая управляет вычислительным процессом, передавая управление подпрограммам, выполняющим конкретные задачи, а затем возвращает его в главную программу. Подпрограмма может вызывать другие подпрограммы, которые, в свою очередь, могут вызывать другие, выполняющие более детальную задачу, но в конечном итоге управление должно вернуться к главной программе. В языках объектно-ориентированного программирования, таких как С++, нет главной программы, каждая «подпрограмма» представляет собой автономный программный объект, который вызывается в действие не командой сверху, а наличием определенных шаблонов данных: программный объект инкапсулирует состояния и процедуры, что при вызове к действию некоторым шаблоном данных воздействует на эти данные, а затем освобождает их [74]. Типичная автономная программа, как и хорошо известная «Игра в Жизнь», представляет собой совокупность простейших автоматов (автоматов, которые могут выполнять вычисления без использования какой-либо памяти), обитающих в двумерной сетке и взаимодействующих друг с другом как соседи. Использование сетки позволяет определять пространственные отношения

самым простым способом: соседи – это автоматы, которые имеют общие ребра или углы, или и то, и другое. Таким образом, в отличие от автономных систем, в которых существует единый набор правил для всех автоматов, в Sugarscape агенты и место притяжения используют разные правила, и правила могут варьироваться от агента к агенту (или от места притяжения к месту другого притяжения), чтобы внести неоднородность в моделирование.

«Игра в Жизнь» также может быть использована для объяснения цели симуляций, подобных Sugarscape. В «Игре в Жизнь» взаимодействия между автоматами, занимающими каждую квадратную ячейку сетки, жестко определены правилами, которые полностью определяют заранее результат любого взаимодействия: например, состояние (мертвое или живое) данного автомата в зависимости от количества его соседей, живых или мертвых, в любой момент. Это означает, что влияние любого взаимодействия на последующее состояние автомата не возникает. С другой стороны, существуют вторичные результаты взаимодействий автоматов, определяющие коллективные паттерны состояний, которые не определяются правилами. Некоторые из этих паттернов, например известные планеры, перемещаются по сетке, хотя положение каждого автомата в пространстве фиксировано.

Следовательно, это движение возникает. Более того, когда два из этих возникающих паттернов состояний взаимодействуют друг с другом (например, когда два планера сталкиваются), результат этих взаимодействий возникает сам по себе. В зависимости от их положения и фазы колебаний, в которой они находятся во время столкновения, существует семьдесят три различных исхода для столкновения двух планеров: двадцать восемь взаимных аннигиляций. Классификация этих результатов должна производиться эмпирически, путем наблюдения за фактическими столкновениями, и не может быть выведена из правил.

Точно так же в Sugarscape поведение агентов и расположение пищи не распознается, но есть вторичные коллективные результаты. Именно эти возникающие результаты являются ценным продуктом моделирования. Однако помимо того, что моделирование может быть использовано в социальных науках,

результаты должны быть значительными, учитывая определенное место питания и случайно распределенную популяцию агентов, например, повторяющийся результат – скопление агентов вокруг источника пищи. Если корм изначально распределяется на двух отдельных участках, популяция образует две отдельные «колонии». Такой результат является неожиданным, поскольку нет правила, предписывающего, что сплоченные группы должны формироваться по соседству с концентрацией «сахара», но он не дает каких-либо дальнейших существенных выводов. Однако есть и другие коллективные модели, которые действительно решают давние проблемы в социальных науках или, по крайней мере, проливают новый свет на возможные решения.

Агенты, поведение которых определяется правилами, полезны для моделирования поведения, поскольку рутины заставляют человеческое поведение казаться управляемым, даже если оно происходит из бессознательного приобретения привычек, а не из преднамеренных попыток придерживаться формальных правил. Последние, однако, являются важным компонентом некоторых социальных объектов, таких как институциональные организации, поэтому агенты, определенные правилами, также могут быть полезны для их моделирования. В любом случае важны возникающие результаты рутинных действий или формально регулируемое поведение, когда задействована целая популяция агентов. С другой стороны, многоагентные системы могут использовать относительную автономию отдельных программных объектов, чтобы внести неоднородность в популяцию. Более того, степень разнообразия можно превратить в параметр, который можно варьировать от цикла к запуску, чтобы проверить его влияние на результаты. Таким образом, симуляции становятся больше похожими на лабораторные эксперименты: многие симуляции можно запускать с разными значениями параметров, чтобы либо исследовать пространство параметров для поиска единичных результатов, либо обнаруживать тенденции, которые остаются инвариантными к изменениям параметров.

Коллективные распорядки важны при моделировании крупных социальных объектов, таких как города [31]. Городские центры меняются медленно, поэтому они

не реагируют на изменения в личном поведении. Однако повторяющиеся коллективные действия, такие как поездка на работу или поездка в магазин членов сообществ, принадлежащих к определенному классу или группе доходов, действительно формируют конститутивные ритмы городов. И наоборот, изменения в транспортных средствах в пределах города может изменить эту практику: например, когда первые железные дороги создавали коммутирующие пригороды для тех классов, которые могли позволить себе изначально высокие тарифы. С другой стороны, социальные процессы, происходящие в меньшем масштабе внутри отдельных сообществ или организаций, могут быть лишь частично смоделированы с помощью процедур и правил – мы также должны иметь возможность моделировать отклонения от рутины в сообществе (например, в ответ на кризис). Для этой и другой цели нужны смоделированные агенты с большей внутренней структурой, чем у Sugarscape. Это так называемые агенты убеждения-желания-намерения (BDI).

Проекты, разработанные в рамках экспериментов студий под руководством Сесила Балмонда и Роланда Снукса (бюро Kokkugia), исследуют нелинейные системы и самоорганизацию как на методологическом, так и на программном уровне. В исследовании изучалась природа и принцип действия сложных систем, а также их применение в проектировании. Это включало как извлечение процессов, которые работают в физическом мире, так и разработку алгоритмических моделей самоорганизации.

Исследование было сосредоточено на программировании конкретного архитектурного замысла на микроуровне. Благодаря интенсивным локальным взаимодействиям эти процессы самоорганизуются, чтобы создать согласованные макромасштабные структуры и формы. Исследователи хотели поставить под сомнение иерархию, которая действует в процессе проектирования. Таким образом, были разработаны многоагентные системы для согласования наборов конфликтующих потребностей, касающихся программы, формы и структуры. Данные факторы последовательной природы архитектурного дизайна начали порождать сложные, мелкозернистые, тектонические организации и набор интенсивных формальных аффектов.

Можно привести в пример экспериментальный проект “Скайнет”, который берет за основу методологию дизайна, генерируя поверхность и топологию за счет накопления линий, которые самоорганизуются в генерирующую структуру. Мультибиоморфные качества агентной системы генерируются как артефакт посредством восходящей логики, в то время как основное намерение инструмента – соответствовать определенным программным требованиям с помощью применения простых рекурсивных процессов. В таком процессе разделение, притяжение, выравнивание, сплоченность, возникновение аффекта контролируется поведением агента. Волокнистая топология границ структуры генерируется с использованием сетевых траекторий многоагентной системы. Агенты развернуты во многих поколениях, использующих прошлые траектории в качестве аттракторов для новых, тем самым создавая стигмергическую иерархию траекторий. Этот процесс повторяется до тех пор, пока не будет развернуто достаточно волокон, чтобы сформировать непрерывную совокупность поверхности, скелета и кожи будущей структуры сооружения.

Еще один проект исследует применение агентных методологий для создания форм. Стигмергическая система работает через итеративное осаждение и испарение вещества агентов. В этом процессе вещество становится катализатором для дальнейших отложений в петле положительной обратной связи, которая порождает сложный процесс формирования. Цель исследования проекта – создать семейство возникающих форм, характеристики которых выявляются в процессе работы сложной системы. Stickmergy генерируется двумя конкурирующими, но взаимозависимыми агентными системами. Первая использует взаимодействие своих агентов – или людей – для определения пространств в здании. Агенты с разными намерениями привлекают друг друга и вместе определяют программные пространства в определенный момент времени. Агенты могут удалять отдельные палки, но по мере увеличения количества палок они могут объединяться, чтобы мешать движению агентов и навсегда изменить определение стены или пола. Каждая палка активно выравнивается с другими вокруг себя, создавая плавный переход векторов через здание. Выравнивание и дублирование палочек создают сильные

аффекты, будучи при этом конструктивно прочными и образующими реализуемую конструктивную систему.

Проект Pixel Studio пытается переосмыслить традиционные отношения между циркуляцией и программой, разрабатывая пространственный язык, который удовлетворяет потребности как распространения, так и программирования; проект бросает вызов необходимости поиска различий в процессе проектирования. Пространственная оболочка была разработана путем модификации исходной базовой топологической поверхности. Топологическая поверхность стала более сложной из-за согласования с пространственным отображением, тем самым нарушая и реформируя топологию по мере необходимости, чтобы поддерживать единый смысл и поддержать программу здания. Тектоническая логика здания возникла как переплетение этой поверхности. Линии, проведенные агентами, в одних областях становятся плотными, образуя полы, крыши и сплошные стены, и распускаются в других областях, образуя окна и двери на фасаде. Строки представляют собой серию из 32 различных блоков, которые читаются как строка и блок. Результат – диалог между линией, поверхностью, частью и целым [86].

Проект «Население ризомы» заинтересован в разрушении существующих нормативных иерархий в практике архитектуры, в то же время стремясь к появлению новых иерархий за счет сложного взаимодействия различных архитектурных систем. Это результат контролируемой и откалиброванной самоорганизации программы и структуры, которая затем закрепляется путем наложения слоев различной интенсивности сплайновых кривых в зависимости от программной функции и особенностей объекта. Проект начинает подвергаться сомнению соотношение между формой / функцией и структурой / орнаментом и приводит к дизайну, обладающему поразительно насыщенным качеством [81].

В следующем проекте исследуется создание сложных топологий посредством самоорганизации программы. Методология многоагентного проектирования была разработана для создания стигмергического взаимодействия между агентами, засеянного программным намерением. Эта самоорганизующаяся система согласовывает различные программные требования, сплетая вместе набор

разрозненных программ в ответ на задание для проектирования междисциплинарного исследовательского центра. В этом процессе программные нити согласовывают набор агентов обращения, которые пытаются поддерживать непрерывность общественного пространства [82]. Метод изоповерхности был разработан для извлечения порога – топологии поверхности – из полученного поля.

Давняя цель исследований в области робототехники – создание гуманоидных роботов. Существует также основополагающее убеждение, что роботы с человеческой морфологией могут лучше адаптироваться к среде, в которой живут люди. Робот, который может ходить, захватывать и транспортировать объекты, а также ощущать окружающую среду способами, аналогичными человеку, был на сегодняшний день наиболее очевидным путем к автоматической машине, которая может производить полезное поведение в среде человека [67].

Стоит обратить внимание на путь создания человекоподобных роботов, вдохновленный наблюдением за природными системами, такими как колонии социальных насекомых, где каждый организм относительно недееспособен, но колония в целом может достичь замечательных результатов, которые выходят далеко за рамки возможностей каждого из ее участников [55, 90].

Типичная система стайного интеллекта обладает следующими свойствами:

- состоит из множества индивидов;
- особи относительно однородны (т.е. все имеют идентичный характер, либо принадлежат к нескольким типологиям);
- взаимодействие между индивидами основано на простых правилах поведения, которые используют только местную информацию, обмениваясь напрямую или через среду;
- общее поведение системы является результатом взаимодействия индивидов друг с другом и со своим окружением.

Другими словами, групповое поведение самоорганизовано.

Одним из наиболее характерных свойств системы стайного интеллекта является высокий уровень координации, проявляемый составляющими индивидуумами (координация, которая достигается без необходимости в

центральной точке управления или в каком-либо внешнем руководстве). Природа дает множество примеров стай, которые выполняют какое-то коллективное поведение, без того чтобы какой-либо человек контролировал группу или не знал об общем поведении группы. Несмотря на отсутствие людей, ответственных за группу, рой в целом может вести себя разумно. Это результат взаимодействия пространственно-соседних особей, которые действуют на основе простых правил [127].

Подход нелинейной динамики в естественных науках и различные аргументы, исходящие из него, такие как клеточные автоматы и теория хаоса, ранее определялись в архитектуре как захватывающие возможности для использования. Аргумент здесь, однако, состоит в том, что эти попытки можно было бы поддержать, если бы мы попытались использовать их в качестве основы того, что Мануэль Деланда называет абстрактной машиной: оперативную диаграмму или методологию создания структуры, помимо метафоры, которая может служить для управления экспериментами и инновациями для достижения конкретных результатов.

Апшур Тауншип – это генеральный план развития нового городка в Апшуре, Индия. Цель заключается в том, чтобы спроектировать и протестировать вышеупомянутую абстрактную машину.

Проект включает в себя конвейер процесса проектирования, целью которого является рассмотрение каждой из различных инфраструктурных сетей поселка: планировочной сети, дорожных сетей, зеленых насаждений, городских центров и т.д., как подсистем – и установления логических взаимосвязей между ними, с использованием стандартных градостроительных показателей. Каждая из подсистем представляет собой простой механизм, основанный на правилах, который вычисляет индексы, такие как высота зданий, для построения соотношения площадей или расстояния между зданиями, ширина дороги и расстояния, на которые можно пройти, а затем пытается исправить себя для достижения минимальных стандартов. К этому общему слою «городской массы» добавляется дополнительный иерархический слой, чтобы его более четко сформулировать. Четыре типа зданий – рядные дома, виллы, городские кварталы и башни – настроены как базовые типы, а

алгоритм занимает доступные участки под застройку и видоизменяется как гибрид базовых типов [93].

Города – это физические следы моделей социального поведения, действующие во времени, руководствующиеся принципами самоорганизации. Ведь сами города следует понимать как совокупность «процессов», как пространства векторных потоков, которые «приспосабливаются» к различным входам и импульсам как некоторая саморегулирующаяся система [126]. Как показал Рем Колхас в своем исследовании Лагоса, очевидный хаос городской жизни следует понимать как чрезвычайно сложную самоорганизующуюся систему, которая сортирует, упорядочивает, классифицирует и перерабатывает информацию в соответствии с вполне ясными экономическими принципами [94]. Гонконг, с его джунглями социальных взаимодействий, можно понимать не как хаотичное и запутанное собрание разрозненных видов деятельности, а как чрезвычайно сложное соединение взаимозависимых микросистем, которые действуют в рамках единого стайного интеллекта.

Можно провести очевидную параллель между способностью к самоорганизации колоний муравьев и термитов и «естественными» моделями роста человеческих городов. Это происходит не случайно, поскольку теория эмерджентности начала развиваться благодаря работам Эрика Бонабо, Марко Дориго и Гая Тераулаза; в итоге была установлена связь между стигмергией поведения муравьев и некоторыми архитектурными действиями.

Важно отметить, что Джонсон распространяет принцип на нейронную сеть мозга и на динамическое поведение городов. Также важно, что он связывает это с работой определенных программ. Отсюда возникает вопрос: если города и программы основаны на аналогичной логике возникновения, как мы можем использовать программы для моделирования города? Сложность материальных вычислений в городе намного превосходит все, что мы могли бы смоделировать с помощью цифровых вычислений. Важно ответить на этот вопрос, изучая потенциал вычислительной методологии моделирования городской формы [79].

Понятие стайного интеллекта следует использовать корректно, чтобы избежать прямой и сводящей аналогии между птицами, муравьями и людьми [60]. Интеллект роя работает в природе при условии, что входные данные уменьшаются и ограничиваются [61].

В термодинамической теории люди рассматривают всю систему как постоянный и бесконечный поиск равновесия и неравновесия. Знание беспорядка вместе с расчетом значения энтропии не только описывает судорожное поведение и динамический обмен, но также объединяет необратимость движения в соответствии со стрелой времени. В этом случае частицы не могут быть полностью предсказуемыми по их индивидуальным траекториям, но их отношения, случайное и взаимное поведение можно проанализировать и описать как протокол трансформации и динамической метаморфозы. Таким образом, свобода системы должна быть квалифицирована в ее мутации с критериями обмена, связанными с внутренней и внешней средой.

Исходя из вышеприведенного исследования и описания генеративных инструментов, стоит суммировать полученную информацию с точки зрения внедрения генеративных методов в творческий процесс архитектора. В связи с этим был разработан план описания каждого метода путем предоставления ответов на вопросы плана. Таким образом, основным результатом исследования является описание генеративных методов и предоставление архитектурных примеров (разработанных с помощью определенного генеративного метода) или моделей.

Выводы по главе 3

1. Выполнены классификации основных методов генеративного моделирования:
 - а. Генетические (эволюционные) алгоритмы.
 - б. Топологические оптимизации.
 - в. Агентные системы.
 - г. Компьютерные симуляции.

2. Разработаны схемы и модели, иллюстрирующие прикладные свойства генеративных методов поиска формы.
3. Получены результаты на основе цифрового ввода данных и алгоритмизации процесса поиска формы, что привело к возникновению большого количества различных вариантов, которые были проанализированы и сопоставлены с точки зрения технико-экономических показателей и эстетики форм.
4. Разработана таблица результатов эксперимента формообразования, которая показала различные свойства оптимизации в зависимости от приложенной нагрузки, опор, материала и геометрии формы.
5. Проанализирован метод с точки зрения влияния на типологию зданий: ангаров, общественных центров, высотного строительства.
6. Выявлена практическая значимость инструментов генеративного и параметрического проектирования на примере экспериментальных проектов и моделей.

Третья глава посвящена разработке серии экспериментов, иллюстрирующих основные методы параметрического и генеративного подходов. Таким образом, данные серии экспериментов делятся на проектные и теоретические. Проект общественного центра в городе Истре является примером поиска архитектурной формы путем внедрения цифровых методов для поиска оптимального проектного решения. В свою очередь, эксперименты с топологическими оптимизациями, анкетными системами были выполнены в результате поиска теоретических выводов, относительно обособлены от проектной деятельности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование показало, что современные технологии в архитектурном проектировании дают возможность создания новых форм путем применения инновационных методов генеративного формообразования. Такие методы имеют непосредственную связь с возникновением Стратегии «Общество 5.0», основной характеристикой которого является внедрение компьютерных технологий во все сферы деятельности человека. Кроме того, такой подход дает возможность экономить человеческие ресурсы в процессе решения рутинных задач, оставляя больше времени для творчества

Методы генеративного формообразования:

1. Генетические (эволюционные) алгоритмы

I. Метод эволюционных алгоритмов опирается на эвристический алгоритм поиска наиболее подходящего решения с использованием инструментов, аналогичных естественному отбору в природной среде. Целью данного метода является поиск наиболее оптимальных решений в контексте определенных параметров и ограничений.

II. Одними из самых главных инструментов данного метода в среде программы Grasshopper (встроенный компонент визуального программирования для Rhinoceros) являются плагины Galapagos и Octopus, которые работают на основе визуального типа программирования.

Алгоритм процесса работы генетического алгоритма заключается в такой последовательности [57]:

1) Первый этап характеризуется моделированием случайного набора решений [111].

2) Пригодность – это оценка каждого решения с точки зрения вводных параметров.

3) Формирование новой популяции характеризуется поиском решений на основе необходимых параметров [120].

4) Выбор на основе необходимых параметров.

5) Из двух лучших решений создать третье наилучшее – рекомбинация.

- 6) Мутация – изменения популяции для более оптимального решения.
- 7) Отказ от новых решений.
- 8) Замена старой популяции на новую.
- 9) Процесс проверки полученной популяции влияет на решение в рамках поставленной проблемы.
- 10) Повторение или остановка процедуры формирования решений проблемы.

III. Ярким примером внедрения генеративных методов в архитектурном формообразовании можно назвать проект многофункционального жилого здания в штате Небраска архитектора-исследователя Nate Holland [72]. Первый этап заключается в построении объемной модели окружения: здания, пешеходные и транспортные пути, участки. Вторым этапом архитектор задает ограничения: площадь застройки, границы участка, расстояния до ближайших существующих зданий и т.д. Компонент Galapagos исследует различные варианты, выбирает наилучшие комбинации, формируя пятна застройки, которые подходят заданным параметрам [69]. Затем архитектор приступает к оптимизации верхних этажей, выстраивая визуальные линии от пола этажа до береговой линии [50].

Заметим, что эволюционные алгоритмы часто применяются в связке с другими инструментами генеративных алгоритмов: например, дополнение Ladybug (к Grasshopper), которое анализирует климат места проектирования. Следовательно, эволюционный алгоритм (инструмент Galapagos) совместно с алгоритмом Ladybug дает возможность подобрать самую оптимальную форму здания, исходя из параметров инсоляции и других особенностей местности [51, 67].

Метод генетических (эволюционных) алгоритмов опробован на проектно-экспериментальной модели №1 общественного центра. Такая модель иллюстрирует процесс того, как компьютерные инструменты могут оптимизировать форму на основе алгоритмов естественного отбора. Входными данными для указанного метода служили климатические показатели региона и пожелания по видовым характеристикам.

2. Метод топологических оптимизаций

I. Топологические оптимизации – это последовательный вычислительный процесс моделирования, работающий в ограниченном прерывистом пространстве [88]. Метод алгоритма может уточнить распределение заданных нагрузок и опор, для того чтобы достигнуть максимальной производительности конструкции или архитектурного элемента [110]. Основная цель использования методов топологических оптимизаций заключается в том, чтобы произвести структурную оптимизацию геометрии, основываясь на исходных параметрах опор, материала, нагрузок и других факторов.

II. Самым популярным инструментом топологических оптимизаций можно назвать компонент Миллипид для программы Rhinoceros в среде визуального языка программирования Grasshopper [116].

Последовательность работы алгоритма топологических оптимизаций:

1) Разработка исходной 3D-модели в среде программы Rhinoceros, экспорт геометрии в программу Grasshopper.

2) Указание исходных параметров подгруженной модели в программе Миллипид – расположение нагрузок (с указанием количества), распределение опор, назначение материала модели.

3) Написание компьютерного скрипта при помощи метода визуального программирования в Grasshopper с подключением необходимых алгоритмов программы Миллипид.

4) Формирование результата топологической оптимизации, где белые участки – это необходимая для работы элемента геометрия, а черные участки – это лишний материал, который не задействован в работе конструкции.

5) Повторение или финальная остановка процесса создания новых топологических оптимизаций исходной модели, но с другими параметрами (материалы конструкции, вариативные нагрузки, положение опорных узлов).

III. Ярким примером внедрения метода топологических оптимизаций является проект навеса на трех опорах, который был разработан исследователями Департамента цифровых технологий Швейцарского федерального технологического института [53]. Главной целью процесса оптимизации было уменьшение объемов материала на 20% от заданной доли при минимальной деформации плиты и равномерном распределении нагрузки на поверхность. Условия основывались на неизменяемом положении трех опорных элементов. Площадь объема плиты была разделена на определенное количество участков, которые впоследствии сформировали растровое изображение в оттенках серого, что дало понимание о распределении материала. Полученное растровое изображение было векторизовано, что дало трехмерную ребристую форму на основе значений оттенков цвета, которые соответствовали определенным узлам.

Метод топологических оптимизаций опробован на проектно-экспериментальной модели № 2 общественного центра в городе. Данная модель иллюстрирует процесс, как компьютерные инструменты могут оптимизировать форму на основе топологических алгоритмов. Входными данными для указанного метода служили динамические и статические нагрузки на объем здания (ветер, снег, гравитация), опорные элементы и материал основных несущих конструкций.

3. Агентные системы

I. Метод агентных систем представляет собой действия, которые образуются определенными взаимодействующими интеллектуальными единицами [64]. Основная цель применения агентных систем в архитектурном и градостроительном проектировании объясняется возможностью оптимизации определенных структур при помощи внедрения природных самоорганизующихся процессов. Можно выделить некоторые типы агентных систем: роевые (движение стаи птиц), стигмергические (самоорганизация муравьев) и другие природные самоорганизации, с которых может быть списана модель поведения для создания алгоритма.

II. Главными инструментами метода агентных систем являются компоненты для программы Grasshopper: Pedsim, Physarealm, Quelea и другие. Вышеперечисленные инструменты были разработаны на основе выявления и изучения поведения движения и реакций микробов, стай птиц, потоков людей, рыб и других объектов.

Метод агентных систем отличается от остальных генеративных алгоритмов, в силу того что на начальном этапе во входных данных компьютерного кода не нужно вводить параметры исходной геометрии.

1) Вначале необходимо разработать алгоритм, который имитирует модель поведения определенного органического элемента или группы таких элементов [30].

2) Вторым этапом работы с алгоритмом является расстановка определенных точек в пространстве, на которые будет реагировать самоорганизующаяся система. Если провести аналогию с природой, то в случае со стаей птиц существует отталкивающий объект (угроза) и притягивающий объект (еда).

3) Следующий шаг – запуск процесса самоорганизации на основе заданных точек (притяжения или отталкивания).

4) Остановка процесса генерации агентных систем на любом этапе (в зависимости от эстетики результата и соответствие основным законам алгоритма).

5) Повторение процесса запуска агентных систем при неудовлетворительном результате первой итерации эксперимента.

III. Проект пирса архитектора Сатору Сугихара является ярким примером внедрения методов агентных систем в архитектурном формообразовании. В качестве метода экспериментального проектирования архитектор применил алгоритмы роевого интеллекта для генерации уникальных футуристических элементов из металлического кабеля. Кроме того, специалистами было проведено физическое моделирование, чтобы улучшить структуру формы по отношению к сжимающимся стержням фермы [62].

Метод агентных систем опробован на проектно-экспериментальной модели № 3 общественного центра в городе. Такая модель иллюстрирует, как компьютерные инструменты могут оптимизировать форму на основе биологических

алгоритмов. Входными данными для указанного метода служили точки начала формы (первичные опорные точки на участке, точки притяжения), точки отталкивания (река, крупномерные деревья, направляющий вектор (ветра, роза ветров)).

4. Компьютерные симуляции

I. Одним из самых важных методов генеративного моделирования можно считать компьютерные симуляции. Целью данного подхода является анализ структуры и процедура экспериментального морфогенеза. Симуляция может обладать как естественным характером (осадки, ветер, солнечная радиация, сейсмическая активность, гравитация), так и искусственным (скручивание, растяжение и др.).

II. Самым распространенным инструментом данного метода моделирования является плагин для Grasshopper – Kangaroo, который включает в себя большое количество различных вариантов физических (компьютерных) симуляций [113].

Последовательность работы с компьютерными симуляциями варьируется в зависимости от результатов получаемых моделей:

1) Ввод исходных данных для инструментов симуляции – погрузка начальной геометрии и выбор вида симуляции.

2) Написание алгоритма симуляции, который включает в себя детали и основные параметры (сила ветровой нагрузки, вес исходного элемента, гравитация, материал и время действия симуляции) [115].

3) Запуск процедуры симуляции.

4) Повторный запуск или остановка процесса симуляции.

III. Самым ярким архитектурным проектом, в который были внедрены симуляции, является собор Саграда Фамилия архитектора А. Гауди, использовавшего вышеназванный принцип задолго до появления компьютерного моделирования [85]. Антонио Гауди подвешивал грузики на нити, тем самым образовался купол собора, который является наиболее оптимизированной геометрией с точки зрения своих конструктивных качеств [87].

Метод симуляций опробован на проектно-экспериментальной модели № 4 общественного центра. Такая модель иллюстрирует, как компьютерные инструменты могут оптимизировать форму на основе физических алгоритмов симуляций. Входными данными для указанного метода служила вертикальная плоскость, динамические и статические нагрузки – в формате векторных направляющих, уточняя характер влияния на форму (скручивание, прямое действие).

Подводя общую черту под изучением генеративных методов моделирования, стоит отметить важность проведенного исследования с точки зрения внедрения нового вида проектного метода, который имеет непосредственное отношение к технологическому прогрессу. Внедрение цифровых методов в архитектурное проектирование связано с непосредственной автоматизацией рутинных процессов проектировщика, что тем самым экономит временные и денежные ресурсы компании [89].

Говоря о генеративном проектировании, можно констатировать, что данный метод проектного творчества является разновидностью машинного обучения, то есть человек закладывает в компьютер необходимые команды, которые должны быть реализованы [97]. Однако, помимо перекладывания рутинных процессов на работу компьютера, архитекторы-программисты пытаются внедрить творческое мышление в работу машины, тем самым задействуются нейронные сети искусственного интеллекта [74]. Здесь важно уловить это развитие от простого черчения до придумывания (воспроизводства) архитектурной идеи, от обычного программного кода – до искусственного интеллекта [122].

Выводы проведенного исследования основываются на том, что на базе зарубежного и отечественного опыта были выявлены и классифицированы основные методы цифрового проектирования [56]. Кроме того, стало очевидно, что современное общество нуждается в новом типе архитектурной застройки, основанной на современных технологиях [128]. Это происходит в силу того, что потребности современного человека постоянно меняются, а традиционные

архитектурные методы воплощают в жизнь такие здания, которые не могут полностью адаптироваться под все изменения жизни и потребности социума [96].

В связи с этим стоит вопрос применения нетрадиционных методов проектирования, способных учитывать будущее развитие здания (после строительства и во время эксплуатации), закладывая различные факторы, которые могут иметь место в будущем. Кроме того, цифровые методы дают возможность выбора архитектурной концепции из серии предложенных компьютерной программой на основе разработанного кода, ориентированного на техническое задание.

В заключение проведенного исследования стоит сказать о том, что важным было проанализировать основные направления цифровой архитектуры, которые разделяются на создание архитектурной идеи посредством архитектора и посредством компьютерных генераций [27]. Оба метода задействуют компьютерные технологии, однако в первом случае моделирование происходит в компьютерной среде, а финальная эстетика принадлежит архитектору. С другой стороны, второй метод задает направление формы посредством условий и параметров, заданных человеком [68].

Кроме того, важным элементом исследования было внедрение природных законов и принципов в цифровизацию процесса архитектурного проектирования. Данное направление является основополагающим в рамках устойчивого развития планеты, применение биомиметических принципов дает неоценимое вдохновение архитектору [28]. Интересен тот факт, что природа работает в соответствии с законом сохранения энергии, это подразумевает, что любая форма органической жизни является априори оптимизированной и адаптированной под те условия, в которых она находится [52]. Более того, в природные организмы заложены мутационные способности; не стоит забывать и о естественном отборе: то есть сама природа оставляет сильных особей.

Таким образом, можно заметить, что каждый живой организм имеет цель (например, являясь частью пищевой цепочки), является адаптированным к существующим условиям и должен проявить себя лучше других, чтобы иметь право

на жизнь. Данные принципы органической жизни были использованы для извлечения некоторых методов компьютерных симуляций и генераций. Их, в свою очередь, архитекторы адаптировали под нужды, связанные с архитектурным проектированием, для того чтобы достичь наиболее оптимизированных результатов, которые можно наблюдать в природе [29].

Таким образом, появились основные направления генеративного проектирования: топологические оптимизации, эволюционные алгоритмы (естественный отбор), агентные системы (биомиметические симуляции) [106]. Некоторые из этих инструментов уже применяются при создании сложной нелинейной геометрии; кроме того, производство современной архитектуры было бы невозможно без использования новых технологий, связанных с внедрением методов генеративного моделирования [70]. Важно отметить, что некоторые сложные формы неподвластны человеческой эстетике и образу композиционной мысли. Таким образом, генеративное компьютерное моделирование дает возможность извлечь природные внутренние процессы и перенести их в архитектуру.

В заключении сформулированы результаты исследования, приведены выводы, обобщены основные положения работы.

1) Выявлено влияние применения основных методов цифрового проектирования на основе анализа процесса поиска формы зарубежной и отечественной архитектуры. Параметрическое и генеративное проектирование основываются на разработке ограничений, правил и алгоритмов, на основе которых будет совершаться формообразование или поиск решения определенной задачи.

В основу параметризма легла теория о гибридном пространстве, данное направление отрицает любые четкие разграничения функционального зонирования, следовательно, помещения перетекают друг в друга, трансформируясь. На основе собранных данных определились решения об ограничениях и условиях процесса поиска параметрической и генеративной формы.

2) Установлено, что в основе генеративных методов лежит информация об исходных данных, а процесс параметризации происходит благодаря установке

необходимых правил посредством компьютерного кода. Основные направления генеративных методов можно охарактеризовать следующим образом:

- поиск формы с нуля (имитация) – необходимо задать законы и ограничения для процесса поиска формы;
- поиск формы от обратного – необходимо задать условия, в которых находится модель, и выбрать метод оптимизации (например, конструктивные оптимизации или улучшение акустических характеристик модели).

Генеративное проектирование в архитектуре – это результат искусственного интеллекта, но на начальной стадии, когда основной контроль и вектор задает человек (архитектор). Искусственный интеллект формирует свой собственный графический язык, который визуально может отличаться от человеческого в силу неестественной формы и компьютерного воплощения, основанный на компьютерных кодах и математике. Выявлено, что искусственный интеллект может быть многофункциональным инструментом и помощником архитектора на различных стадиях архитектурного проектирования, тем самым экономя рабочее время человека; в свою очередь, архитектор будет контролировать и направлять методы искусственного интеллекта. Кроме того, на финальной стадии выбора образа здания архитектор будет руководствоваться своими знаниями, композицией, гармонией и пропорциями.

3) Разработана классификация методов поиска формы, работающих на принципах генеративного моделирования:

- генетические алгоритмы – поиск формы при помощи алгоритмов эволюционного развития;
- топологические оптимизации – изменение существующего объема для оптимизации количества материала, задействованного в работе конструкции;
- компьютерные симуляции – поиск формы на основе внедрения статических и динамических нагрузок;
- агентные системы – поиск формы на основе имитации процесса поведения определенного природного организма.

Вышеперечисленные методы были внедрены при создании экспериментальных моделей, что еще раз доказало эффективность применения генеративных методов на этапе поиска формы, сформирована уникальная эстетика каждого метода, и решены поставленные задачи:

- поиск наиболее правильного решения, исходя из поставленных задач;
- оптимизация используемого материала и конструктивной схемы;
- устойчивость модели к динамическим и статическим нагрузкам;
- поиск формы, основанный на природных процессах.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Тема данного исследования многогранна в силу того, что компьютерные технологии и искусственный интеллект постоянно развиваются – это открывает новые направления для изучения и внедрения в процесс архитектурного формообразования и моделирования. Таким образом, стоит выделить наиболее перспективное направление методов генеративного моделирования – комбинирование различных алгоритмов с новейшими разработками в области компьютерного зрения, а именно: оценить возможности применения компьютерного зрения (искусственного интеллекта) в рамках архитектурного формообразования.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты исследования могут быть использованы для разработки рекомендаций по цифровому формообразованию с целью получения новых композиционных приемов и методов создания выразительного образа архитектурных объектов. Автором намечена подготовка учебного пособия с целью отработки системного подхода к поиску новых творческих методов в рамках цифрового формообразования в архитектуре.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азизян, И.А. Теория композиции как поэтика архитектуры [Текст] / И.А. Азизян, И.А. Добрицына, Г.С. Лебедева. – М.: Прогресс-Традиция, 2002. – 568 с.
2. Аль-Кинди. Книга о пяти сущностях [Текст] / Избранные произведения мыслителей стран Ближнего и Среднего Востока. – М.: Искусство, 1971.
3. Анисимов, Л.Ю. Принципы формирования архитектуры адаптируемого жилища / Л.Ю. Анисимов // дис. ... канд. арх.: 18.00.02 / Анисимов Лев Юрьевич; [Место защиты: Моск. архитектур. ин-т]. – М., 2009. – 139 с.
4. Архитектурное формообразование и геометрия [Текст] / И.А. Бондаренко, Г.В. Есаулов, Ю.Л. Косенкова [и др.]; под ред. Н.В. Касьянова. М.: ЛЕНАНД, 2010.
5. Асанович, А. Компьютерные средства и эволюция методологии архитектурного проектирования / Асанович Александр [Текст]: автореф. дис. ... д-ра арх. (18.00.01). – МАРХИ. – М., 2007. – 341 с. URL: <http://www.dissercat.com/content/kompyuternye-sredstva-i-evolyutsiya-metodologii-arkhitektornogo-proektirovaniya#ixzz4vP5vtsGA>
6. Ахундов, Н.Д. Концепции пространства и времени: истоки, эволюция, перспективы [Текст] / М.: Наука, 1983.
7. Барабанов, А.А. Клод-Николя Леду. Архитектура, рассмотренная в отношении к искусству, нравам и законодательству [Текст] в 2 т./ Екатеринбург: Архитектон-Изд. УралГАХА, КАНОН, 2003.
8. Блинов, Ю.И. Тентовые здания и сооружения (аспекты мягких покрытий и перспектива развития) / Ю.И. Блинов // дис. ... д-ра техн. наук 05-23-01. Строительные конструкции, здания и сооружения. – М.: МИСИ, 1992. – 401 с.
9. Бруно, Дж. Диалоги [Текст] / М.: Просвещение, 1949 8. Брунов, Н. И. Очерки по Истории архитектуры [Текст]: в 2 т. / под ред. С.Л. Рыкова. – М. – Ленинград, 1937.
10. Бунин, А.В. История градостроительного искусства [Текст]: в 2 т. / А.В. Бунин, Т.Ф. Саваренская. – М.: Стройиздат, 1979

11. Волынский, В.Э. Информационно-технологические методы проектирования в архитектурном формообразовании / Дис. ... канд. арх. – М., 2012. – 202 с.
12. Гайдученя, А.А. Динамическая архитектура: (Основные направления развития, принципы, методы) / А.А. Гайдученя, // – Киев: Будівельник, 1-983. – 94 с.
13. Галиулин, Р.В. Двумерные дискретные группы с конечной фундаментальной областью, их физический и гуманитарный смыслы [Текст] 181 / Журнал вычислительной математики и математической физики. 2005. Т. №8.
14. Глазычев, В.Л. Проект и время [Текст]/ Сб. Проблемы дизайна – №2. – М., 2004.
15. Гоголкина, О.В. Особенности формирования конструкций в параметрической архитектуре. / Строительство и архитектура. – М., 2018. – 355 с.
16. Делёз, Ж. Тысяча плато. Капитализм и шизофрения [Текст] – Миннеаполис, У-Фактория, Астрель, 2010 г.
17. Деррида, Ж. Голос и феномен, и другие работы по теории знака Гуссерля [Текст] / Пер. с фр. С. Г. Кашиной и Н. В. Сулова; Серия. – СПб.: Алетейя, 1999. – 208 с.
18. Деррида, Ж. О грамматологии [Текст] / Пер. с фр. и вст. ст. Н. Автономовой. – М.: Аб Магпет, 2000. – 512 с.
19. Дженкс, Ч. Новая парадигма в архитектуре. [Электронный ресурс]./ Ч. Дженкс, // – Режим доступа: <http://pda.cih.ru/772.html>. дата обращения (19.04.20)
20. Добрицына, И.А. От постмодернизма к нелинейной архитектуре. / И.А. Добрицына // Автореф. дис. ... д-ра арх. – М., 2007. – 24 с.
21. Еремеева, А.А., Поморов, С.Б., Пойдина, Т.В. Параметризм в архитектуре. Поиски и решения // Вестник АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – 2014. – № 1-2. – С. 118–122.
22. Зейтун, Ж. Организация внутренней структуры проектируемых архитектурных систем [Текст] – М.: Стройиздат, 1984.
23. Какабадзе, З.М. Проблема «экзистенциального кризиса» и трансцендентальная феноменология Эдмунда Гуссерля [Текст] –Тбилиси, 1966.
24. Корниенко, В. Толковый словарь современного английского языка для

продвинутого этапа. // Специальное издание для СССР в 2 т. – М.: Русский язык, 1982. – 182 с.

25. Корухов, В.В. Методологические проблемы исследования структуры пространства [Текст]: В.В. Корухов, А.Л. Симанов, О.В. Шарыпов. М., 1985.

26. Красильников, Н. Проблемы современной архитектуры [Текст] / Н. Красильников // Современная Архитектура. 1928. №6.

27. Кузин, Ф.А. Диссертация. Методика написания. Правила оформления. Порядок защиты. [Текст]: Практическое пособие для докторантов, аспирантов и магистрантов / Под ред. Абрамова В.А. – 3-е изд., доп. – М.: Ось-89, 2008. – 448 с.

28. Лебедев, Ю.С. Архитектура и бионика / Ю.С. Лебедев // изд. 2-е, перераб., и доп. – М.: Стройиздат, 1977. – 221 с.

29. Лежава, И.Г. Проблема выявления пространственных инвариантов в архитектурных объектах [Текст]: И.Г. Лежава, М.В. Шубенков / В сб. Города и системы расселения. – М., 1985. – №6.

30. Лежава, И.Г. Структурные особенности формирования архитектурных объектов [Текст] / В сб. Города и системы расселения. – М., 1985. – №6.

31. Лежава, И.Г. Функция и структура формы в архитектуре [Текст]: дис. ... д-ра архитектуры. – М.: МАРХИ, 1987.

32. Мерло-Понти, М. Феноменология восприятия / М. Мерло-Понти; ред. Л.В. Арсеньева; пер. с фр. под ред. И.С. Вдовиной, С.Л. Фокина. – СПб.: Ювента; Наука, 1999. – 606 с.

33. Орлов, В.И. Развитие объекта проектирования в ходе проектного поиска. Автореф. дис. ... канд. арх. – М.: МАРХИ, 1982. – 24 с.

34. Отто, Ф. Висячие покрытия; редакция, предисловие и дополнения канд. техн. наук И.Г. Людковского / Ф. Отто // – М.: Госстройиздат, 1960. – 180 с.

35. Отто, Ф. Пневматические строительные конструкции. Конструирование и расчет сооружений из тросов, сеток и мембран / перевод с нем. А.А. Гогешвили / Ф. Отто, // Р. Тростель. – М.: Стройиздат, 1967. – 319 с.

36. Поморов, С.Б., Пойдина, Т.В. Параметризм в архитектуре. Поиски и решения // Вестник АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – 2014. – № 1-2. – С. 118–122 с.

37. Салех, М.С. // *Architecture and Modern Information Technologies*. – 2020. – №2(51). – С. 351–361. – URL: https://marhi.ru/AMIT/2020/2kvart20/PDF/19_saleh.pdf DOI: 10.24411/1998-4839-2020-15119 (дата обращения 15.10.2020).
38. Сапрыкина, Н.А. Основы динамического формообразования в архитектуре: Учеб. для вузов / Н. А. Сапрыкина, // – Допущено Учен. советом МАРХИ. – М.: КУРС, 2021. – 384 с.
39. Сапрыкина, Н.А. Новые подходы к формированию инфо-пространства будущего как отдельной категории архитектурной среды [Электронный ресурс] / Н.А. Сапрыкина, // *Architecture and Modern Information Technologies*. – 2018. – No1(42). – С. 317–340. Режим доступа: http://marhi.ru/AMIT/2018/1kvart18/23_saprykina/index.php (дата обращения 15.10.2020).
40. Сапрыкина, Н.А. Тезаурус параметрической парадигмы формирования архитектурного пространства [Электронный ресурс] / Н.А. Сапрыкина // *Architecture and Modern Information Technologies*. – 2017. – No3(40). – С. 281–303. Режим доступа: http://marhi.ru/AMIT/2017/3kvart17/21_saprykina/index.php (дата обращения 15.10.2020).
41. Точка Ветвления. Параметрическая архитектура: лекции, воркшопы, исследования [Электронный ресурс]. <http://branchpoint.ru/>.
42. Федоров, Е. Правильное деление плоскости и пространства [Текст]: Л., 1979.
43. Челноков, А.В. Методы формообразования в цифровой архитектуре / А.В. Челноков, Д.А. Корниенко // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. – 2013. – Выпуск No 6 (183). – С. 25–29.
44. Шайю, С. Обзор архитектурного искусственного интеллекта // *Гарвардская высшая школа дизайна*. – 2019.
45. Шубенков, М.В. Жизнеспособные городские системы: Опыт работы конференции в Токио в мае 2003 года [Текст] // *Архитектурная наука и образование*.

– М., 2004.

46. Шубенков, М.В. Статистико-вероятностный подход к исследованию закономерностей формообразования архитектурно-пространственных систем [Текст] // Архитектурная наука в МАРХИ. – М., 1997. 184 с.

47. Шумахер, П. Параметризм – Новый Глобальный Стилль для Архитектуры и Городского Дизайна /П. Шумахер // – Лондон AD Architectural Design – Digital Cities. – 2009.– Вып. 79. – No 4, июль/август – С. 24–39.

48. Щепетков, Н.И. Светодизайн города и интерьера // Светотехника. М., 2021. – С. 92–107.

49. Allen, S. From Object to Field / S. Allen // Architectural Design. – 1997. – №5. – P. 24–31.

50. Asymptote Architecture: The Arc River Culture Theatre. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://archinect.com/firms/project/106327/the-arc-river-culture-theatre/89216551> (дата обращения: 30.04.21)

51. Bahaudin, A.Y. A Comparison of the Green Building's Criteria / A.Y. Bahaudin // School of Technology Management & Logistics, College of Business, Universiti Utara Malaysia. – 2014. – 11 p.

52. Balascakova, P. Adaptive Facade Systems / P. Balascakova // Energy Design - Adaptive Facade Systems / Seminar Energy Design. – 2016. – 109 p.

53. Banham, R. The Architecture of the Well-Tempered Environment / R. Banham, // The University of Chicago Press; 2nd edition. – 1984. – 320 p.

54. Block, P. Thrust network analysis: exploring three-dimensional equilibrium. / P. Block // Massachusetts Institute of Technology. – 2009. – P. 45–92.

55. Bonabeau, E. Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems / E. Bonabeau // New York and Oxford: Oxford University Press. – 1999. – №1. – P. 61–80.

56. Cai, B.Y. Treepedia 2.0: Applying Deep Learning for Large-scale Quantification of Urban Tree Cover. / B.Y. Cai // IEEE International Congress on Big Data (BigData Congress). – 2018. – P. 49–56.

57. Curl, J.S. The Oxford Dictionary of Architecture / J.S. Curl // Oxford University Press. – 2015. – 1040 p.

58. DeLanda, M. Intensive Science, Virtual Philosophy / M. DeLanda // London: Continuum. – 2002. – №4. – P. 402–565.
59. DeLanda, M. Material Complexity / M. DeLanda // Digital Tectonics London: Wiley. 2004. – №2. – P. 462–465.
60. Deneubourg, J.L. The dynamics of collective sorting: Robot-like ant and ant-like robot. / J.L. Deneubourg // In In Proceedings of the First Conference on Simulation of Adaptive Behavior: From Animals to Animats. – 1991. – P. 356–365.
61. Deneubourg, J.L. The self-organizing exploratory pattern of the argentine ant. / J. L. Deneubourg // Journal of Insect Behavior. – 1990. – P. 159–168.
62. Doersch, C. What makes Paris look like Paris? / C. Doersch // In ACM Transactions on Graphics. SIGGRAPH. New York, NY: ACM Press. – 2012.
63. Dorigo, M. Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem. / M. Dorigo // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. – 1997. – P. 53–66.
64. Dorigo, M. Ant colonies for the travelling salesman problem. / M. Dorigo // Biosystems. – 1997. – P. 73–81.
65. Eberhart, M. A new optimizer using particle swarm theory / M. Eberhart, // Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science MHS'95. – 1995. – P. 39–43.
66. Ebevele, R.O. Polymer science and technology / R.O. Ebevele // CRC Press, Boca Raton, New York. – 2000. – 544 p.
67. Feuerstein, G. Biomorphic Architecture: Menschenund Tiergestalten in Der Architektur/ G. Feuerstein // Human and Animal Forms in Architecture Edition Axel Menges. – 2002. – 208 p.
68. Forty, A. Words and Buildings: A Vocabulary of Modern Architecture. / A. Forty // New York: Thames & Hudson. – 2000. – P. 41–59.
69. Frampton, K. Modern Architecture: A Critical History (Third Edition, Revised and Enlarged). / K. Frampton // London: Thames and Hudson. – 1992.
70. Frazer, J. An Evolutionary Architecture / J. Frazer // AA: London, UK. – 1995. – 128 p. 116.

71. Frazer, J. An Evolutionary Architecture now. / J. Frazer // London: Architectural Association. – 1995. – P. 36–45.
72. Frearson, A. Passing Cloud by Tiago Barros [Электронный ресурс] / A. Frearson // 2011. Режим доступа: <https://www.dezeen.com/2011/10/17/passing-cloud-by-tiago-barros/> (дата обращения: 11.06.20)
73. Friesen, M.R. A Survey of Agent-Based Modeling of Hospital Environments / M.R. Friesen // IEEE Access. – 2014. – P. 227–233.
74. Fry, B. Processing: A Programming Handbook for Visual Designers and Artists / B. Fry // Camb., MA: MIT. – 2007. – P. 20–87.
75. Fukuda, T. Learning, Adapting and Prototyping / T. Fukuda // Proceedings of the 23rd International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA). – 2018. – Vol 1. – P. 9–18.
76. Gabriel, W. Process Visualization and Simulation for Hospital Planning / W. Gabriel // Vienna UT. – 2011. – P. 26–37.
77. Geiger, D. U.S. Pavilion at EXPO 70 Features Air-Supported Cable Roof [Электронный ресурс] / D. Geiger // 1970. Civil Engineering – ASCE. – Режим доступа: <http://www.columbia.edu/cu/gsap/BT/DOMES/OSAKA/cable.html> (дата обращения: 06.01.20)
78. Generative Design for BIM / BIM AND SCRIPTING: BEIJING NATIONAL AQUATICS CENTER – 2015. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://yeswebim.wordpress.com/2015/04/13/bim-and-scripting-beijing-national-aquatics-center/> (дата обращения: 24.05.21)
79. Gericke, O. Fabrication of concrete parts using a frozen sand formwork, spatial structures in the 21st century. / O. Gericke // IASS symp. Tokyo. – 2016.
80. Gibson, L.J. Cellular materials in nature and medicine. / L.J. Gibson // Cambridge: Cambridge University Press. – 2010. – P. 15–42.
81. Girshick, R. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation. / R. Girshick // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Columbus, OH. – 2014. – P. 580–587.

82. Goel, A. Are Buildings Only Instances? Exploration in Architectural Style Categories. / A. Goel //In B. Triggs, K. Bala, & S. Chandran (Eds.), Proceedings of the Eighth Indian Conference on Computer Vision, Graphics and Image Processing. New York: ACM Press. – 2012.
83. Goldstein, R. Schedule - Calibrated Occupant Behavior Simulation / R. Goldstein // Proceedings of SimAUD. – 2010. – P. 3–10.
84. Gunawardena, T. Innovative Flexible Structural System Using Prefabricated Modules. / T. Gunawardena // JOURNAL OF ARCHITECTURAL ENGINEERING. – 2016. – Vol. 22.
85. Hafner, I. Co-Simulation using the Building Controls Virtual Test-Bed. / I. Hafner // Vienna UT. – 2013. – P. 36–66.
86. Heinz, P. Herstellungsverfahren und Anwendungsbereiche für funktional gradierte Bauteile im Bauwesen. / P. Heinz //Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl.– 2011.
87. Hensel, M. Emergence: Morphogenetic Design Strategies. / M. Hensel // Architectural Design. John Wiley & Sons Ltd. – 2004. – Vol. 74.
88. Hensel, M. Emergent Technologies and Design. / M. Hensel // New York: Routledge. – 2008.
89. Hensel, M. Techniques and Technologies in Morphogenetic Design. / M. Hensel //Architectural Design. John Wiley & Sons Ltd. – 2006. – Vol. 76.
90. Heppner, F. A Stochastic nonlinear model for coordinated bird flocks / F. Heppner, // The Ubiquity of Chaos. – 1990. – P. 233–238.
91. Herrmann, M. Gradientenbeton – Untersuchungen zur Gewichtsoptimierung einachsiger biege- und querkraftbeanspruchter Bauteile. / M. Herrmann // Universität Stuttgart. – 2015.
92. Johnson, P. Deconstructivist architecture: The Museum of Modern Art, New York. / P. Johnson // New York: Museum of Modern Art. – 1988. – P. 58–67.
93. Jolliffe, I.T. Principal Component Analysis. / I.T. Jolliffe //Second Edition. New York: Springer-Verlag New York. – 2002. – P. 48–57.

94. Kant, I. *The Critique of Judgment* (1790). / I. Kant // trans. Edited by J. C. Meredith. Oxford: Clarendon Press. – 1952. – P. 38–67.
95. Kelly, K. *Out of Control*, Cambridge / K. Kelly // MA: Perseus Books; *New Rules for the New Economy*, London: Fourth Estate. – 1998. – P. 135–198.
96. Kennedy, R. Particle swarm optimization / R. Kennedy // In *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*. – 1995. – P. 19–84.
97. Kohlhammer, T. Systemic Behaviour of Plane Reciprocal Frame Structures. / T. Kohlhammer // *Structural Engineering International*. – 2010. – P. 80–86.
98. Kolarevic, B. Digital Morphogenesis and Computational Architectures. / B. Kolarevic // In *Construindo (n)o espacio digital (constructing the digital Space): Proceedings of the 4th Iberoamerican Congress of Digital Graphics. SIGraDi*. Rio de Janeiro, Brasil: Universidade Federale do Rio de Janeiro. – 2000. – P. 98–103.
99. Kovaleva, D. Rosenstein-Pavillon. / D. Kovaleva // *Beton- und Stahlbetonbau Jun Universität Stuttgart*. – 2018. – № 113(6). – P. 43–42.
100. Krizhevsky, A. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. / A. Krizhevsky // *Advances in Neural Information Processing Systems*. New York: Curran Associates Inc. – 2012. – P. 1097–1105.
101. Kron, J. *High-tech: the industrial style and source book for the home*. / J. Kron // New York: Clarkson Potter. – 1984. – P. 18–97.
102. Lauer, C. Morphology and porosity of the spines of the sea urchin *Heterocentrotus mammillatus* and their implications on the mechanical performance. / C. Lauer // *Zoomorphology Nov*. – 2017. – P. 137–139.
103. Lee, S. Linking Past to Present: Discovering Style in Two Centuries of Architecture. / S. Lee // *IEEE International Conference on Computational Photography ICCP*. – 2015. – P. 180–187.
104. Llamas, J. Classification of Architectural Heritage Images Using Deep Learning Techniques. / J. Llamas // *Applied Sciences*. – 2017. – №7(10). – 992 p.
105. Lynch, K. *The image of the city*. / K. Lynch // Cambridge: MIT Press. – 1960.– P. 18–57.

106. Mendes, R. The fully informed particle swarm: Simpler, maybe better / R. Mendes // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. – 2004. – №8 (3). – P. 204–210.
107. Obeso, A.M. Connoisseur: classification of styles of Mexican architectural heritage with deep learning and visual attention prediction / A.M. Obeso // 15th International Workshop on Content-Based Multimedia Indexing (CBMI). – 2017. – P. 19–97.
108. Onians, J. Bearers of Meaning: The Classical Orders in Antiquity, the Middle Ages, and the Renaissance. / J. Onians // Princeton: Princeton University Press. – 1988. – P. 139–197.
109. Parigi, D. Three-dimensional Reciprocal Structures: Morphology, Concepts, Generative Rules. / D. Parigi // IASS-APCS Proceedings: from spatial structures to space structures, Seoul, Korea. – 2011. – P. 72–83.
110. Rahim, A. Contemporary Techniques in Architecture. / A. Rahim // Architectural Design. John Wiley & Sons Ltd. – 2002. – V. 72. – № 1.
111. Reynolds, C. Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model / C. Reynolds // Computer Graphics. – 1987.– №21(4). – P. 25–34.
112. Rippmann, M. Funicular shell design: geometric approaches to form finding and fabrication of discrete funicular structures. / M. Rippmann // ETH Zurich. – 2016.
113. Rippmann, M. Interactive vault design. / M. Rippmann // International Journal of Space Structures. – 2012. – P. 219–230.
114. Rossi, A. The architecture of the city. / A. Rossi// Cambridge: MIT Press. Rowe, C. The Mathematics of the Ideal Villa. Cambridge: MIT Press. – 1976. – P. 139–197.
115. Rößler, M. Coupling of Thermodynamical Systems / M. Rößler // Vienna UT.– 2012. – P. 26–36.
116. Sakamoto, T. From Control to Design: Parametric / T. Sakamoto // Algorithmic Architecture. Barcelona: Actar. – 2008.

117. Schmeer, D. Weight-optimized and mono-material concrete components by the integration of mineralized hollow spheres, interfaces: architecture, engineering, science. / D. Schmeer // IASS Symp. Hamburg. – 2017.

118. Selvaraju, R.R. Grad-CAM: Visual Explanations from Deep Networks via Gradient-Based Localization. / R.R. Selvaraju// IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), Venice. – 2017.– P. 618–626.

119. Shalunts, G. Architectural style classification of building facade windows. /G. Shalunts//Advances in Visual Computing. ISVC 2011. Lecture Notes in Computer Science. New York: Springer, Berlin, Heidelberg. – 2011.– V. 6939.– P. 280–289.

120. Shi, Y. A modified particle swarm optimizer/ Y. Shi // The IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. – 1998.– P. 69–73.

121. Sobek, W. Adaptive systems: new materials and new structures. / W. Sobek //In: Bell Michael, Buckley Craig (Hg), editors. Post-ductility. Metals in architecture and engineering New York: Princeton Architectural Press. – 2012. – P. 129–133.

122. Tan, W.R. Ceci n'est pas une pipe: A deep convolutional network for fine-art paintings classification. / W.R. Tan // IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Phoenix, AZ. – 2016. – V. 3703–3707.

123. Ueda, T. Discovering Building Blocks for Human Based Genetic Algorithms. / T. Ueda // Illinois Genetic Algorithms Laboratory. – 2008.– Report № 2007020.

124. Wolfflin, H. Principles of Art History: The Problem of the Development of Style in Later Art. / H. Wolfflin // Edited by 7th Edition Trans. M.D. Hottinger. New York: Dover. – 1950. – P. 618–626.

125. Wolfgang, L. Analysis of Fractal Architecture using the Box - Counting Method / L. Wolfgang // Vienna UT. – 2014. – P. 157–162.

126. Wörner, M. Gradientenbetontechnologie: von der Mischungsentwicklung über den Bauteilentwurf bis zur automatisierten Herstellung. / M. Wörner //Beton- und Stahlbetonbau. – 2016. – №111(12). – P. 794–805.

127. Zhang, F. Measuring human perceptions of a large-scale urban region using machine learning. / F. Zhang // Landscape and Urban Planning. – 2018. – P. 148–160.

128. Zhang, F. Recognizing architecture styles by hierarchical sparse coding of blocklets. / F. Zhang // Information Sciences. – 2018. – Vol. 254(1). – P. 141–154.

129. Zhou, B. Learning deep features for scene recognition using places database. / B. Zhou // In Z. Ghahramani, M. Welling, C. Cortes, N.D. Lawrence, & K.Q. Weinberger (Eds.). Advances in Neural Information Processing Systems. Curran Associates, Inc. – 2014. – P. 487–495

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

В изданиях, рецензируемых ВАК:

1. Салех, М.С. Применение современных методов автоматизированного проектирования для формообразования и расчета сооружений прогрессивной архитектуры // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. Москва, 2016. – № 6 декабрь. С. 8–13.

2. Салех, М.С. Основные направления развития цифровых методов проектирования в новейшей архитектуре // Architecture and Modern Information Technologies. – 2020. – №2(51). – С. 351–361. – URL: https://marhi.ru/AMIT/2020/2kvart20/PDF/19_saleh.pdf DOI: 10.24411/1998-4839-2020-15119

3. Салех, М.С. Топологическая оптимизация в архитектурном формообразовании // Архитектура и строительство России ВХУТЕМАС – 100 №3 (235) 2020 ISSN 02357259. С. 110–114.

4. 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

5. Салех, М.С. Особенности разработки уникальных архитектурных решений с использованием цифровых методов на основе визуального программирования // Строительные материалы и изделия. 2022. Т. 5. № 1. С. 54–59. DOI: 10.34031/2618-7183-2022-5-1-54-59

В других изданиях:

6. Салех, М.С. Бионика и геометрическое формообразование в архитектуре Сантьяго Калатравы // Сборник статей международной молодежной научной конференции «Прочность, ползучесть и разрушение строительных и машиностроительных материалов и конструкций». Москва, 18–21 ноября, 2014.
7. Салех, М.С. Параметризм как новый глобальный стиль в архитектуре // Сборник статей международной научно-практической конференции «Гуманитарные и общественные науки: опыт, проблемы и перспективы». Ставрополь, апрель 2016. ISBN 978-5-905519-03-1, Логос.
8. Салех, М.С., Рынковская, М.И. Application of lattice shells when shaping progressive architecture // Сборник статей «Mongeometrija». Сербия, Белград, 23–26 июня 2016.
9. Салех, М.С. Принципы работы и область применения технологии 3d-печати в архитектуре и строительстве // Наука, образование и экспериментальное проектирование – 2017. Труды МАРХИ. Тезисы докладов международной научно-практической конференции преподавателей, молодых ученых и студентов МАРХИ – 2017. Сборник тезисов. – М.: МАРХИ, 2017. – С. 335–336.
10. Салех, М.С. Влияние методов параметрического проектирования на геометрию здания на примере алгоритмических инструментов анализа окружающей среды // Наука, образование и экспериментальное проектирование – 2018. Труды МАРХИ. Материалы научно-практической конференции преподавателей, молодых ученых и студентов МАРХИ – 2018. Сборник тезисов. – М.: МАРХИ, 2018. – С. 314.
11. Салех, М.С. Влияние методов параметрического проектирования на геометрию здания на примере алгоритмических инструментов анализа окружающей среды // «Наука, образование и экспериментальное проектирование – 2018». Труды МАРХИ. Материалы научно-практической конференции преподавателей, молодых ученых и студентов МАРХИ – 2018. Сборник статей. – М.: МАРХИ, 2018. – С. 120–126.
12. Салех, М.С. Применение кинетических фасадных систем для адаптации к климатическим особенностям местности // Электронный журнал «Здания высоких

технологий», 2019. – [Электронный ресурс] Режим доступа: http://zvt.abok.ru/articles/523/Kineticheskie_fasadnie_sistemi

13. Салех, М.С. Методика поиска архитектурной формы путем применения принципов генетического алгоритма с помощью цифровых технологий на примере общественного центра в городе Истре // Наука, образование и экспериментальное проектирование – 2019. Труды МАРХИ. Материалы научно-практической конференции преподавателей, молодых ученых и студентов МАРХИ – 2019. Сборник тезисов. – М.: МАРХИ, 2019.

14. Салех, М.С. Методика поиска архитектурной формы путем применения принципов генетического алгоритма с помощью цифровых технологий на примере общественного центра в городе Истре // Наука, образование и экспериментальное проектирование – 2019. Труды МАРХИ. Материалы научно-практической конференции преподавателей, молодых ученых и студентов МАРХИ - 2019. Сборник статей. – М.: МАРХИ, 2019.

15. Салех, М.С. Архитектурное проектирование сетчатых оболочек: оптимизация и поиск формы // Реабилитация жилого пространства горожанина. Материалы XVI Международной научно-практической конференции им. В. Татлина. – Пенза, 2020.

16. Салех, М.С. Методы природной самоорганизации в архитектуре на примере проекта общественного центра // Наука, образование и экспериментальное проектирование – 2020. Труды МАРХИ. Материалы научно-практической конференции преподавателей, молодых ученых и студентов МАРХИ – 2020. Сборник тезисов. – М.: МАРХИ, 2020.

17. Салех, М.С. Генеративное формообразование архитектурных объектов с использованием методов природной самоорганизации // Наука, образование и экспериментальное проектирование – 2020. Труды МАРХИ. Материалы научно-практической конференции преподавателей, молодых ученых и студентов МАРХИ – 2020. Сборник статей. – М.: МАРХИ, 2020.

18. Салех, М.С. Проблемы применения методов цифрового и физического формообразования в архитектурном проектировании // Архитектура и

архитектурное наследие: тезисы межвузовской научной конференции. Сборник статей. – М., 2021.

19. Салех, М.С. Анализ социально-философских исследований в контексте формирования новой цифровой архитектуры // Наука, образование и экспериментальное проектирование – 2021. Труды МАРХИ. Материалы научно-практической конференции преподавателей, молодых ученых и студентов МАРХИ – 2021. Сборник тезисов. – М.: МАРХИ, 2021.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
МОСКОВСКИЙ АРХИТЕКТУРНЫЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ)

На правах рукописи



САЛЕХ Мария Сальвановна

**МЕТОДЫ АРХИТЕКТУРНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ
НА ОСНОВЕ ГЕНЕРАТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

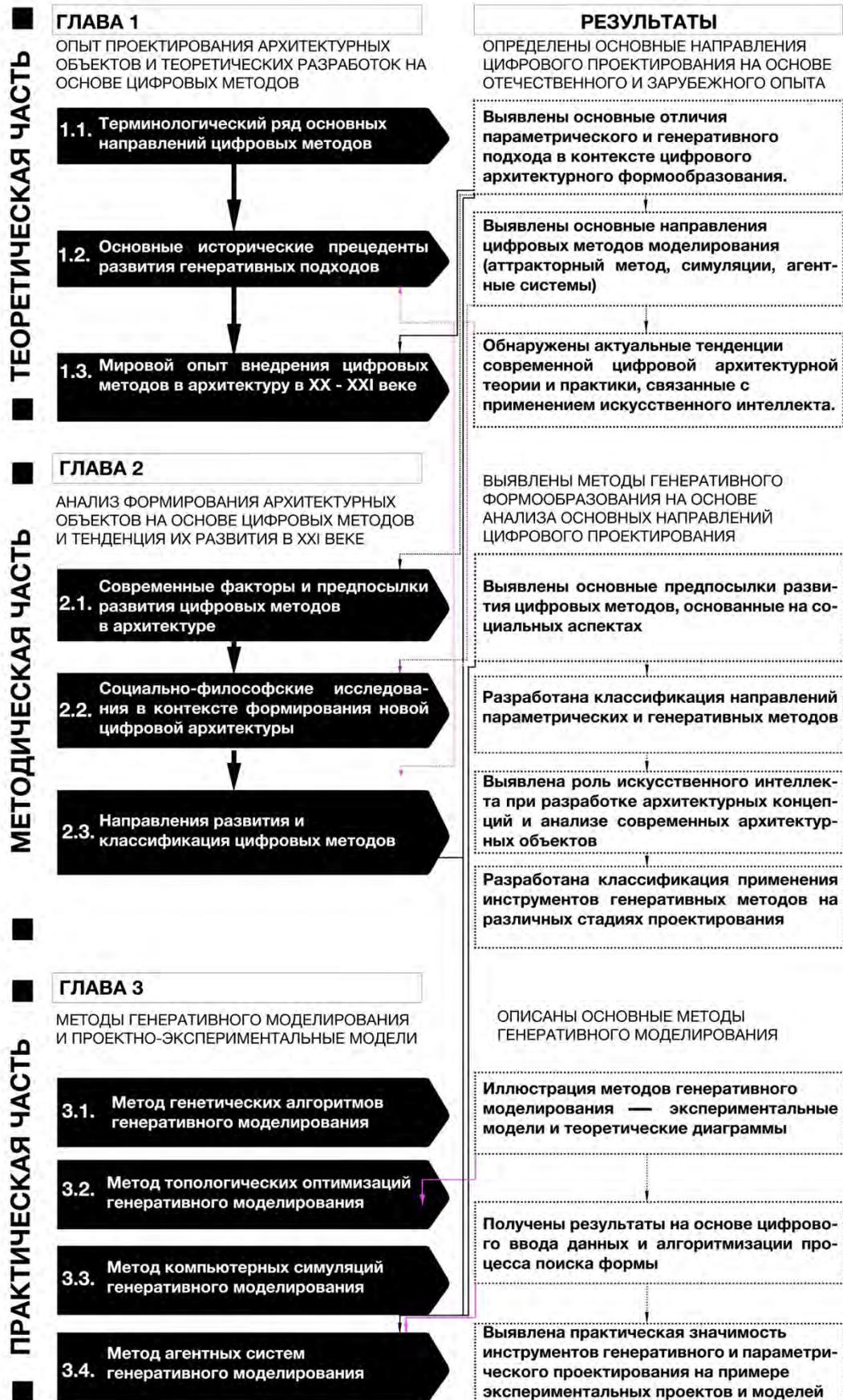
Специальность **2.1.11** – Теория и история архитектуры,
реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата архитектуры
ТОМ II
ПРИЛОЖЕНИЯ

Научный руководитель:
доктор архитектуры, профессор
Сапрыкина Наталия Алексеевна

Москва – 2023

СТРУКТУРА ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ



ИЛЛЮСТРАЦИИ И ТАБЛИЦЫ ВВЕДЕНИЕ

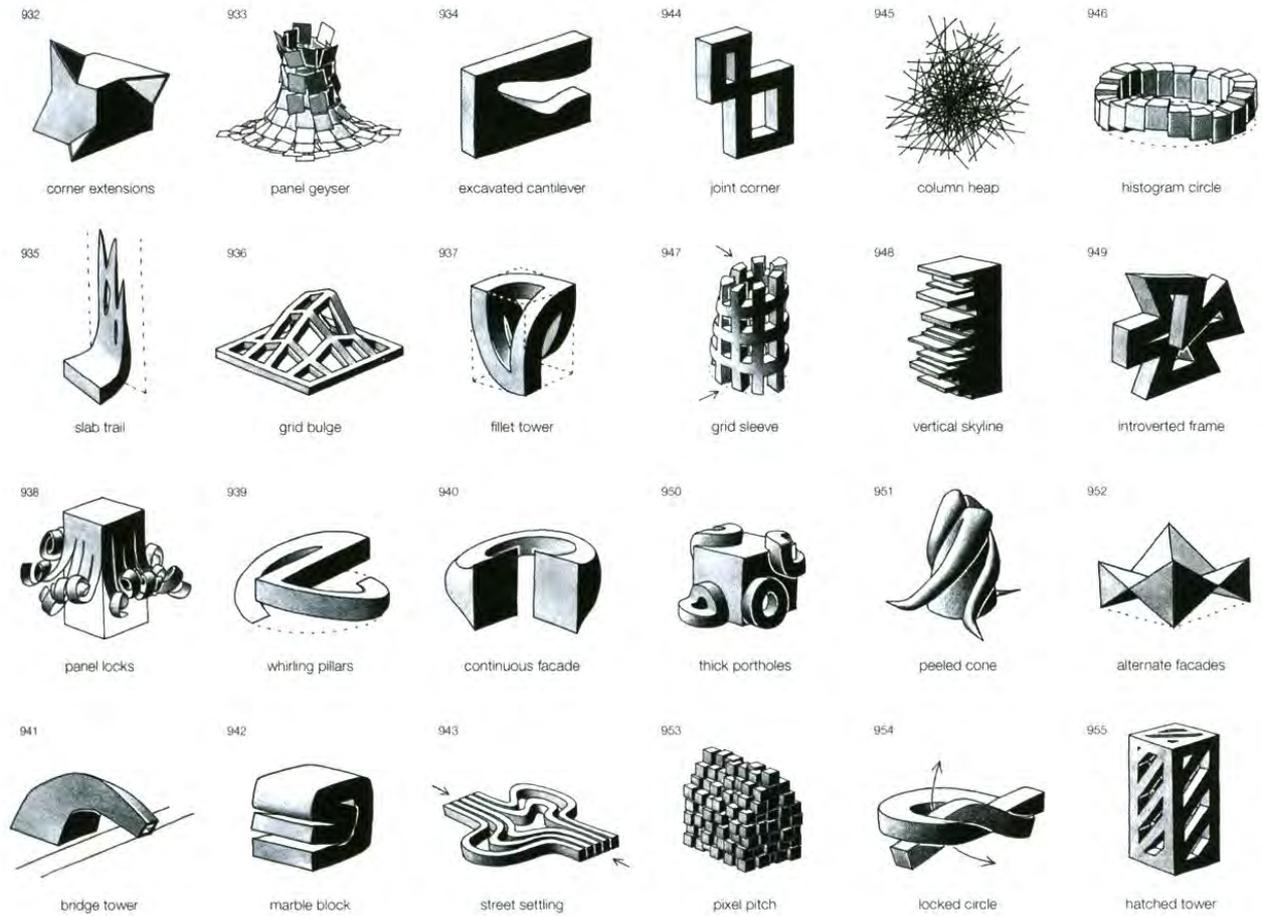


Рис. 1. Вариации различных форм



Рис. 2. Здание Ichii Renovation с параметрическим фасадом, архитекторы PODA, Япония, 2013. Аттракторный метод моделирования

ГЛАВА 1. ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АРХИТЕКТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РАЗРАБОТОК НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ МЕТОДОВ

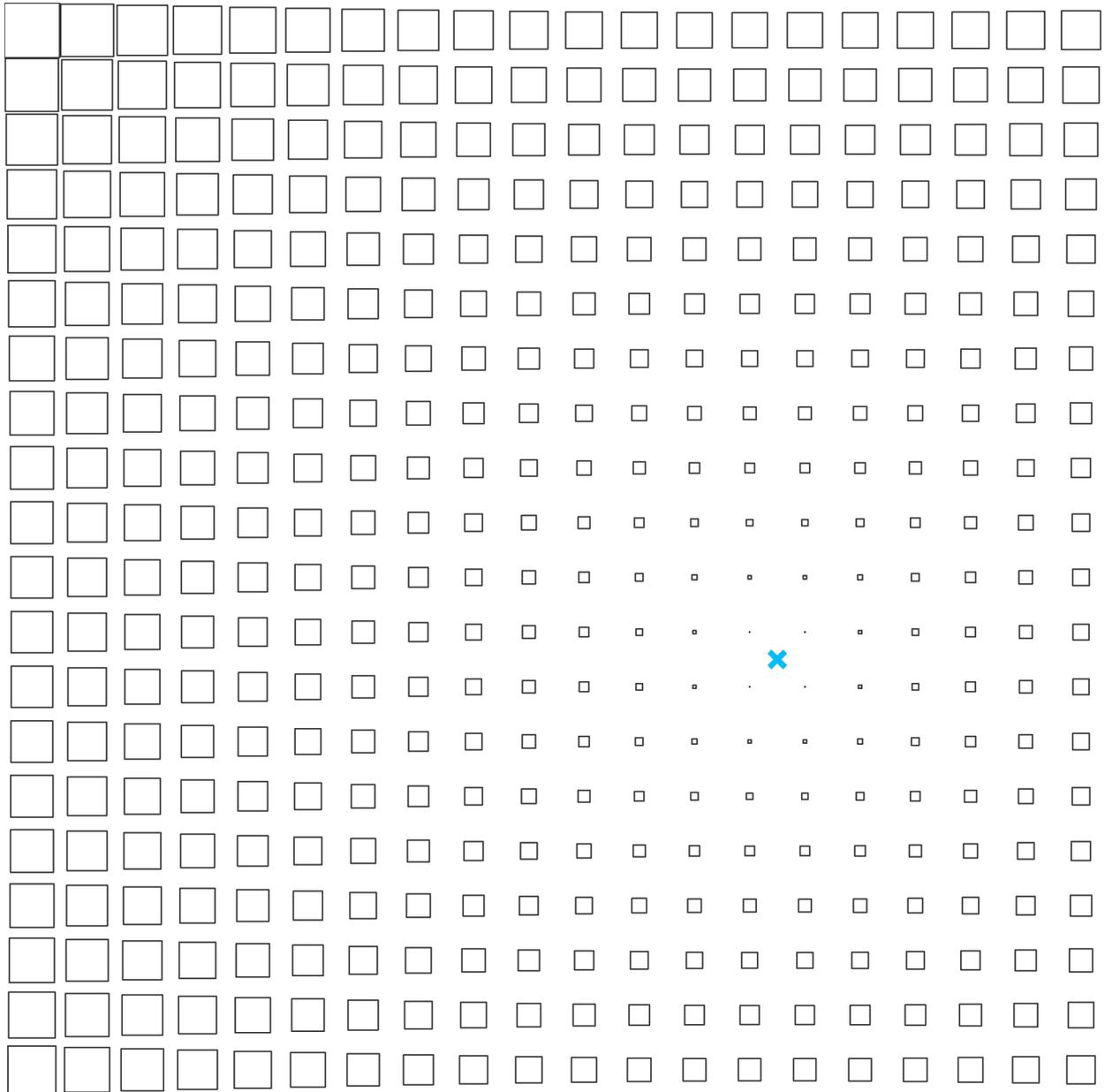


Рис. 3. Пример аттракторного процесса метода параметрического моделирования. Электронный учебник программы Grasshopper

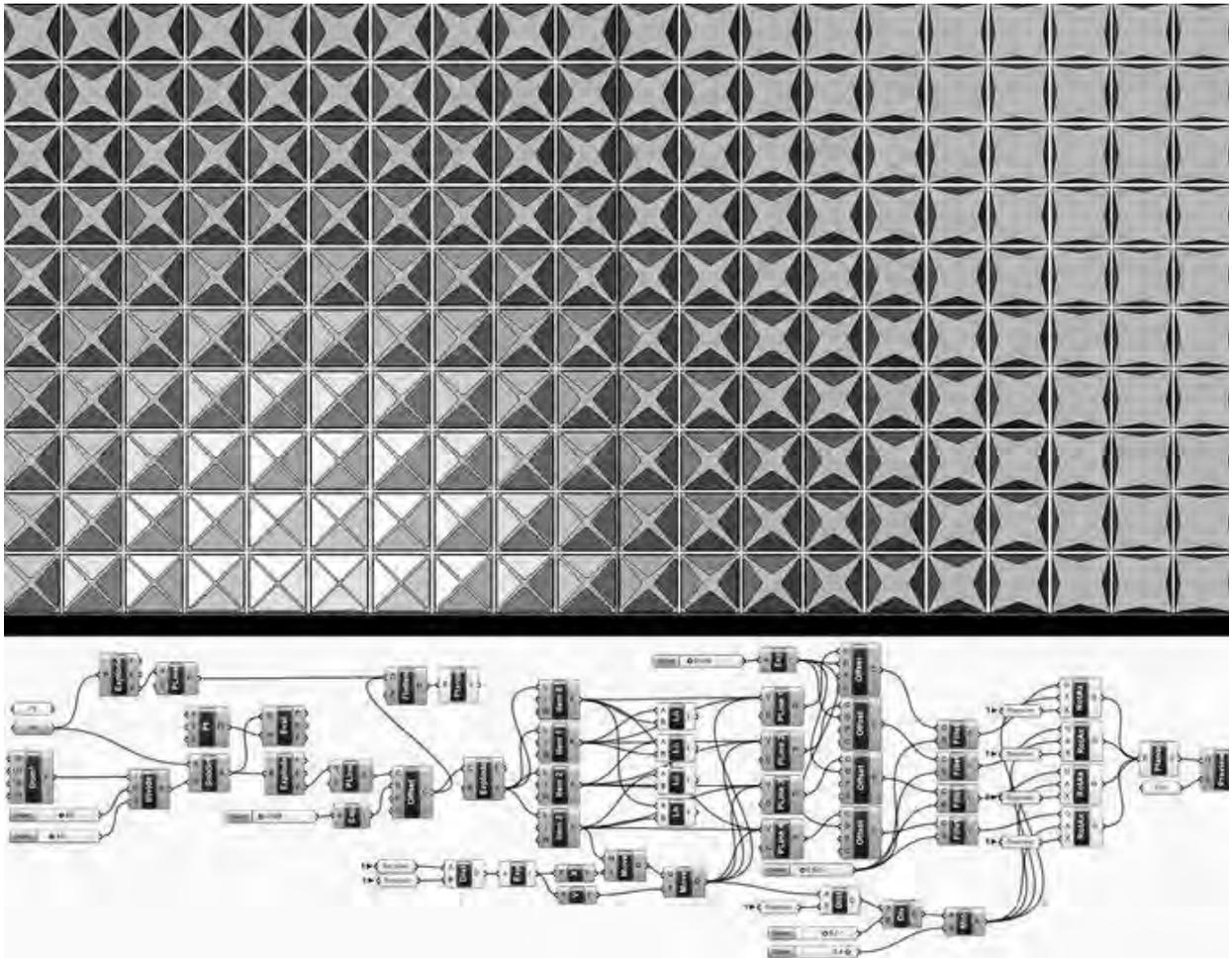


Рис. 4. Пример аттракторного процесса метода параметрического моделирования с кодом в программе Grasshopper. Электронный учебник программы Grasshopper

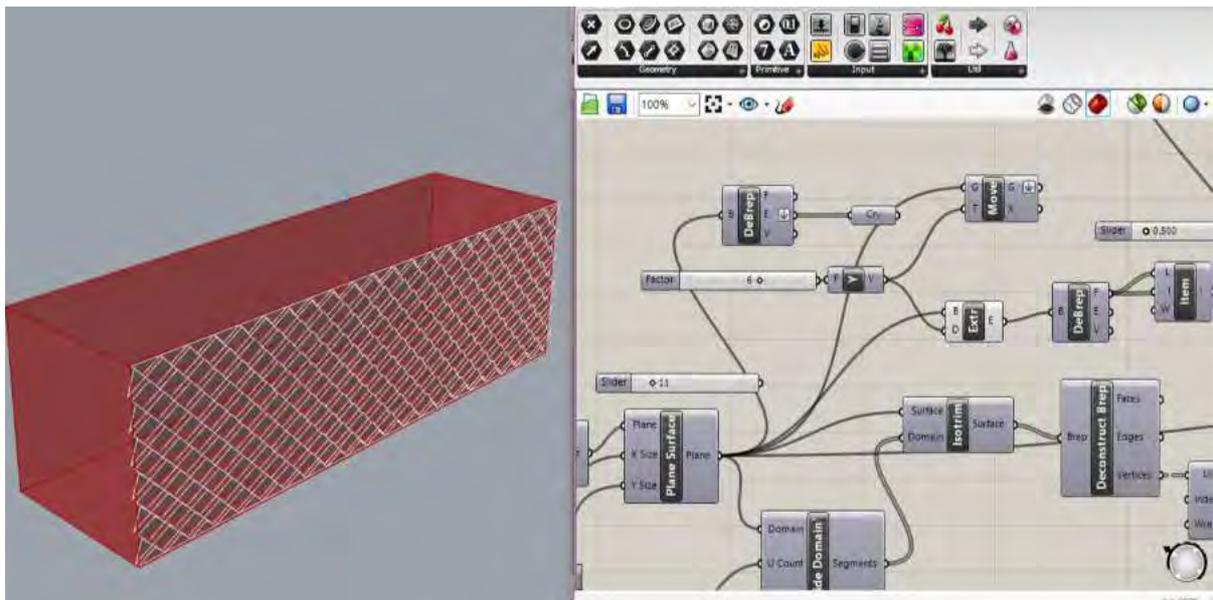


Рис. 5. Пример аттракторного процесса метода параметрического моделирования с кодом в программе Grasshopper. Интерфейс программы



Рис. 6. Центр Гейдара Алиева в Баку. Zaha Hadid Architects, 2012

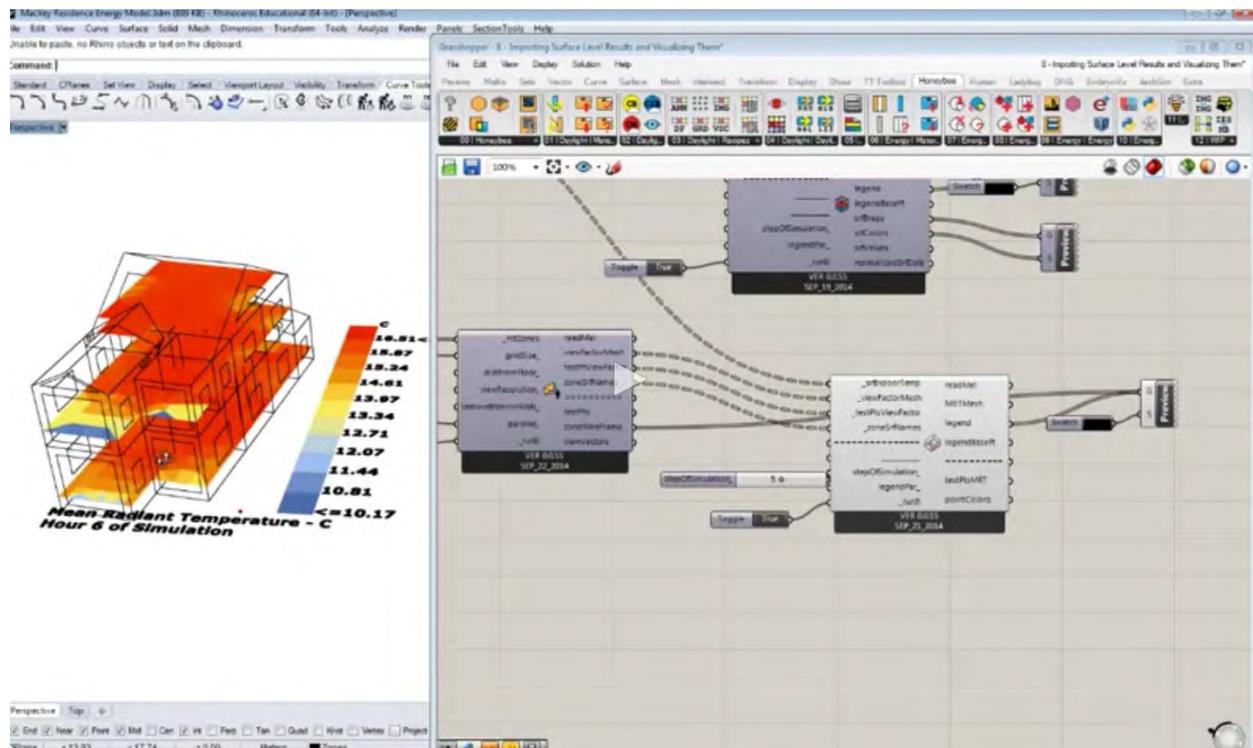


Рис. 7. Интерфейс программы Rhinoceros и плагина Grasshopper.
Анализ инсоляции здания

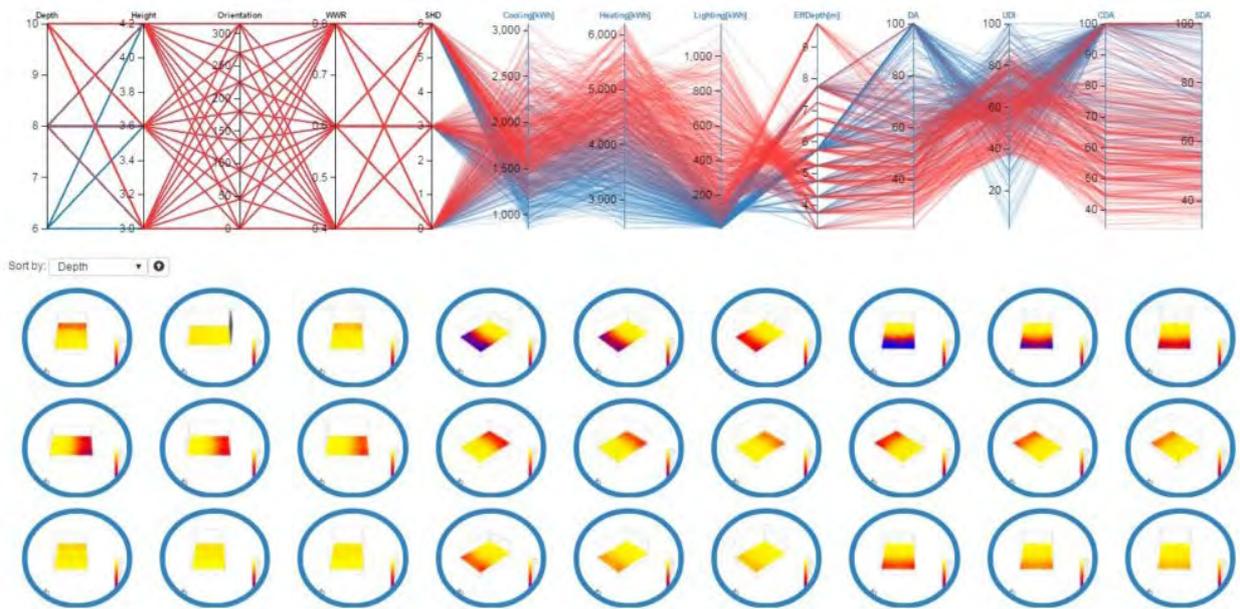


Рис. 8. Анализ и раскладка наиболее оптимальных вариантов ориентации поверхности. Интерфейс программы Rhinoceros и плагина Grasshopper

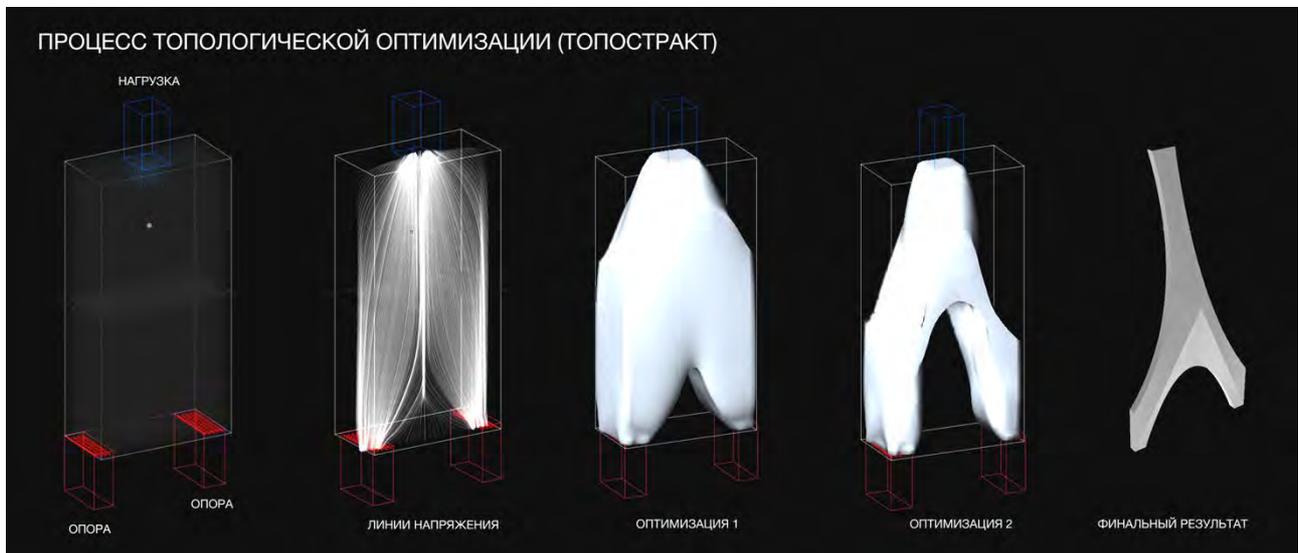


Рис. 9. Анализ и топологическая оптимизация конструктивных элементов

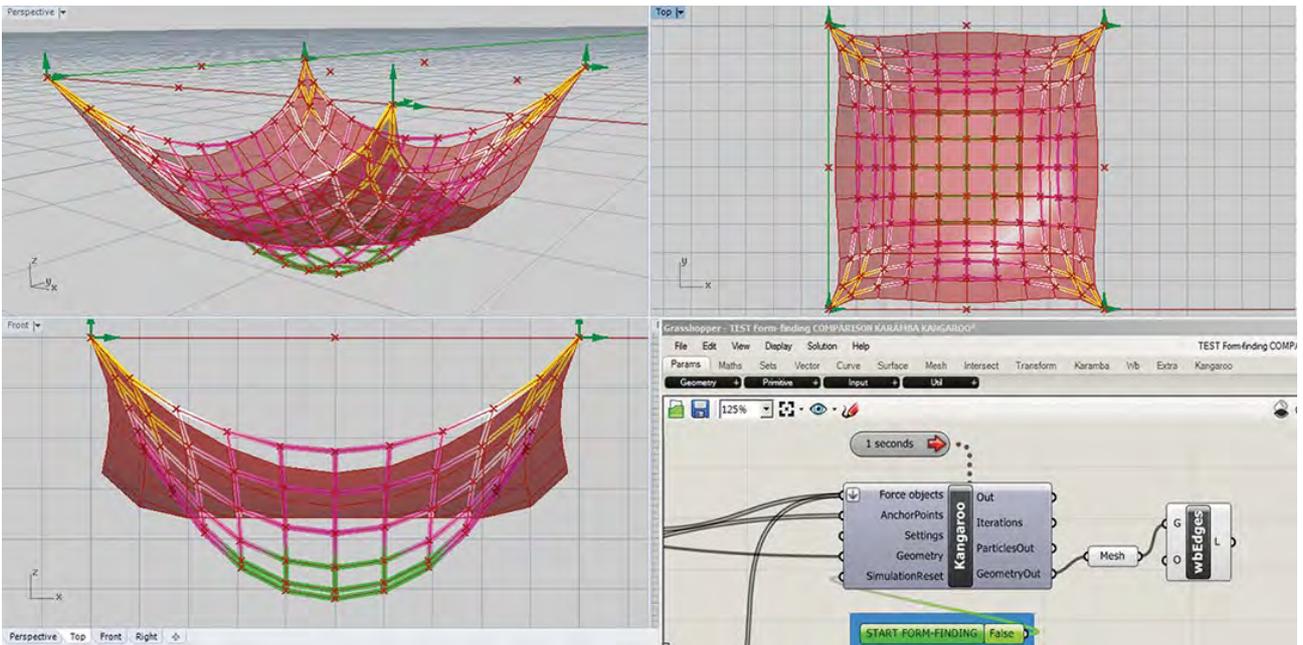


Рис. 10. Симуляции при поиске архитектурной формы. Интерфейс программы Rhinoceros и плагина Grasshopper

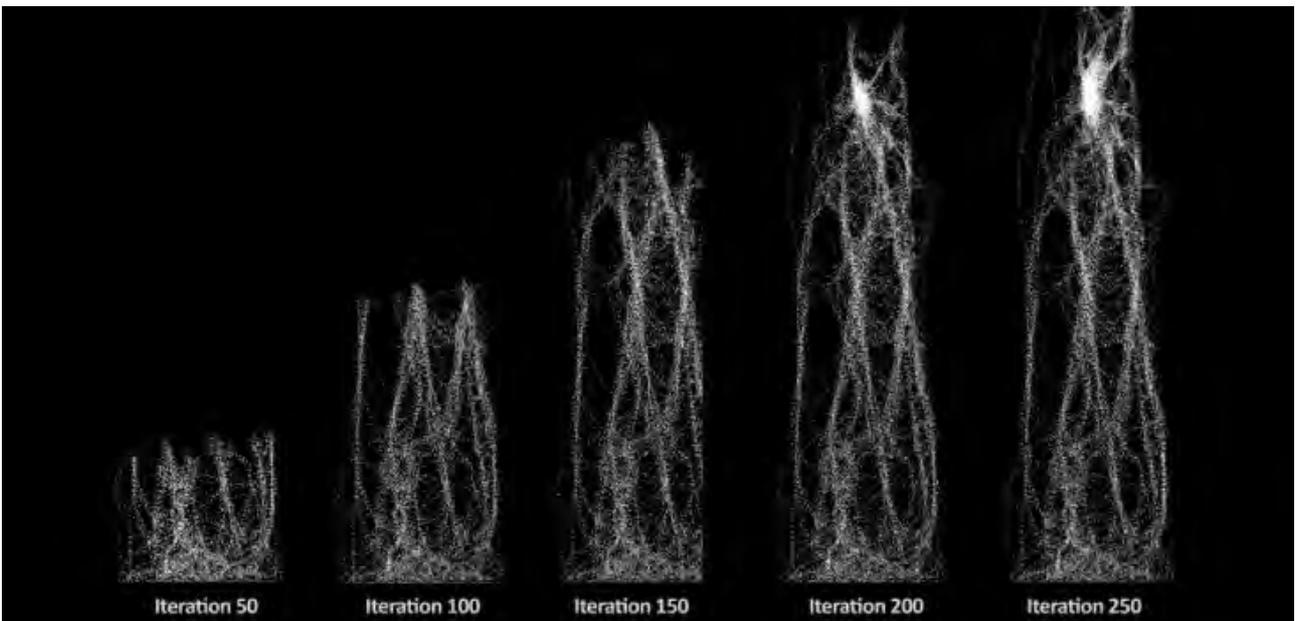


Рис. 11. Формообразование при помощи агентных систем, программа Processing

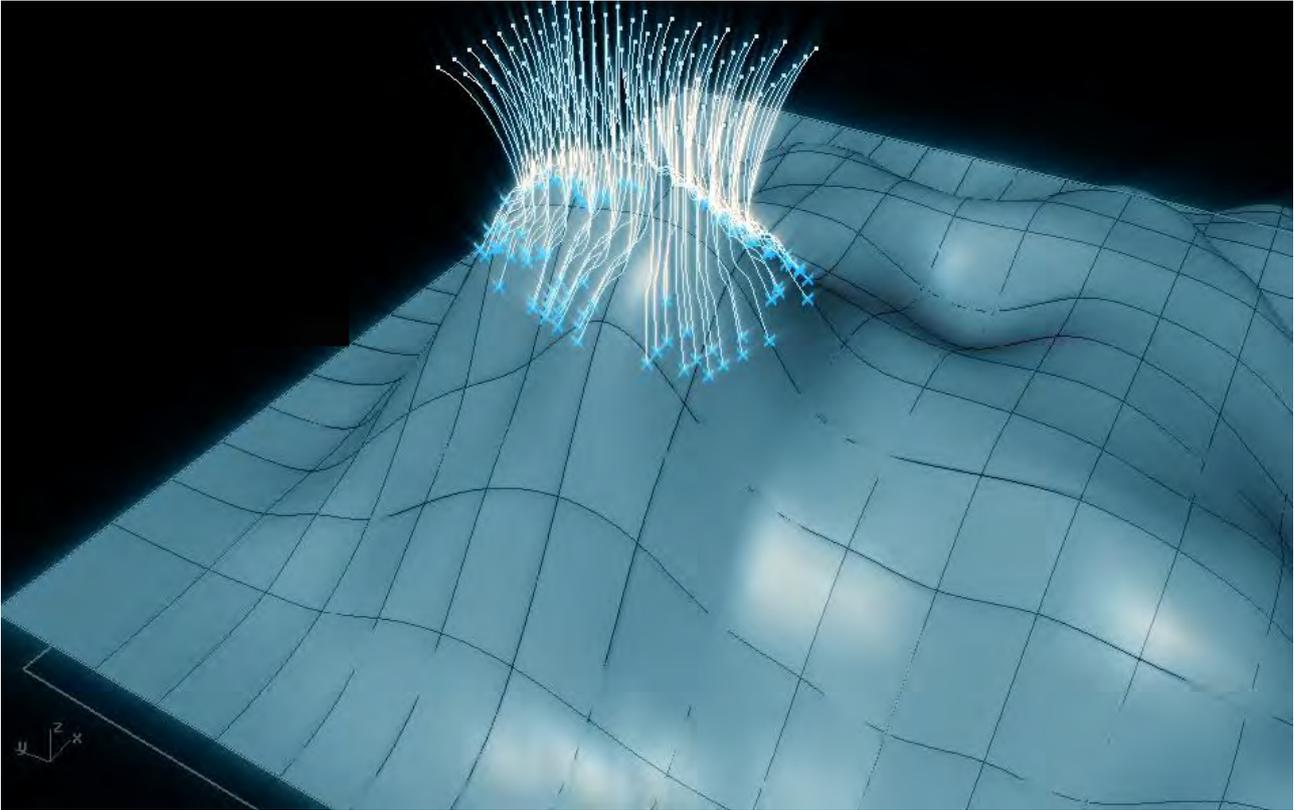


Рис. 12. Применение агентных систем для анализа движения воды по поверхности, программа Rhinoceros и Grasshopper



Рис. 13. Самоорганизация стаи скворцов

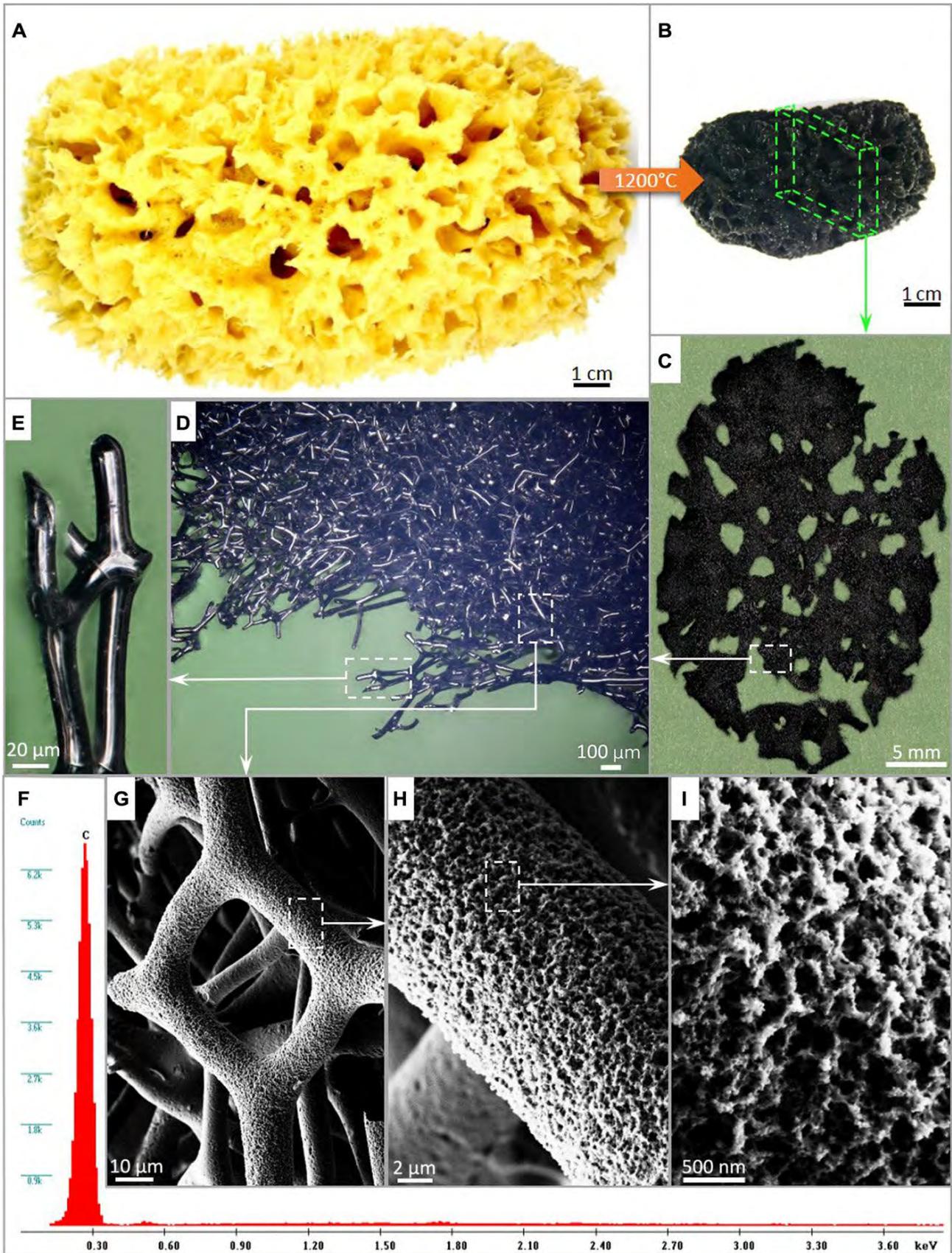


Рис. 14. Обзор превращения каркасов из спонгина в карбонизированную трехмерную структуру при 1200°C

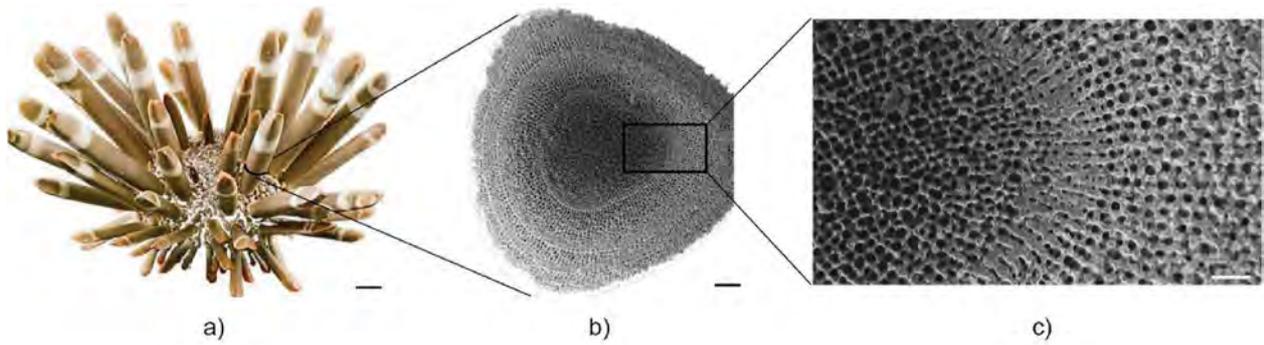


Рис. 15. Изучение структуры морского ежа *Heterocentrotus mammillatus* (a), поперечное сечение позвоночника (b) и крупный план стереомной структуры (c), масштабная шкала = 1 мм. Впоследствии данные исследования использовались для создания генеративного павильона. Тюбингенский университет



Рис. 16. Павильон Розенштейна, Университет Штутгарта, ILEK, 2012



Рис. 17. Возможности BIM-технологий на различных этапах здания



Рис. 18. Развитие индустрии с XVIII по XXI век



Рис. 19. Характеристики и возможности индустрии 4.0

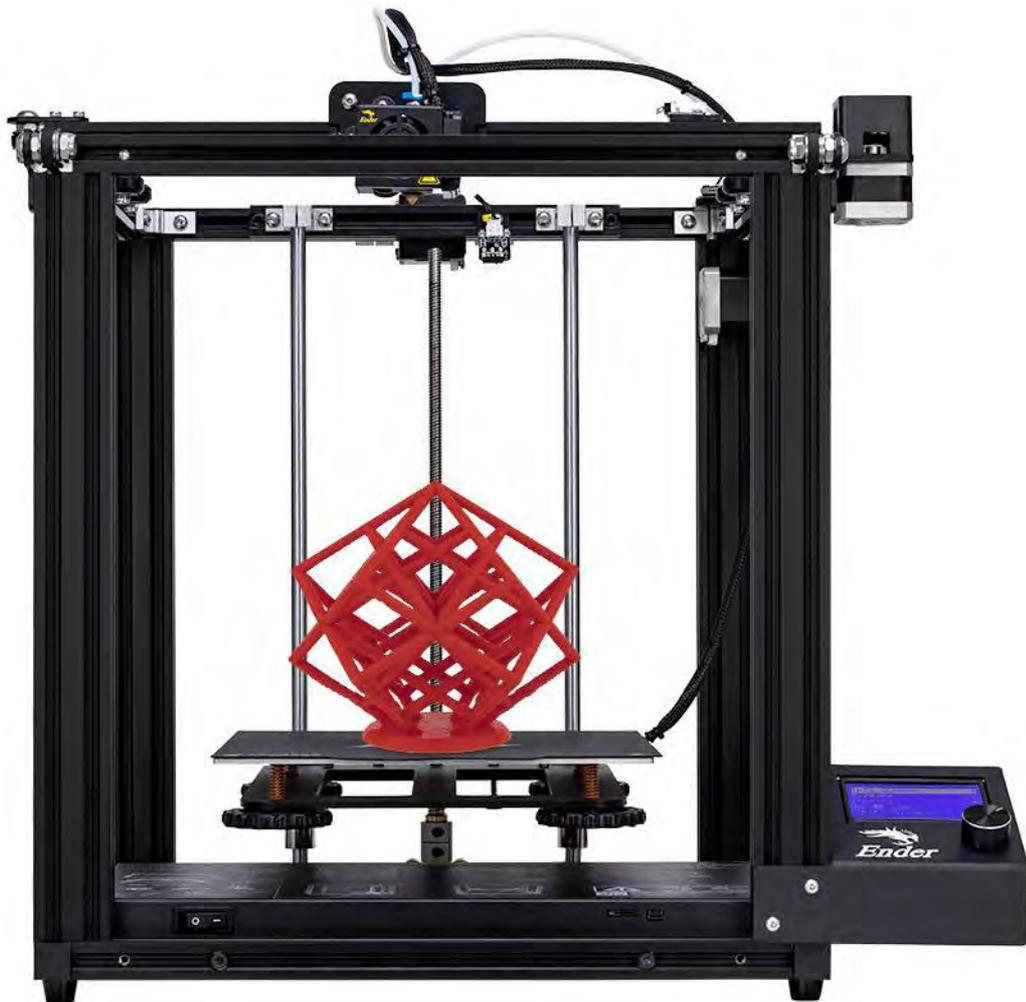


Рис. 20. FDM 3D-принтер

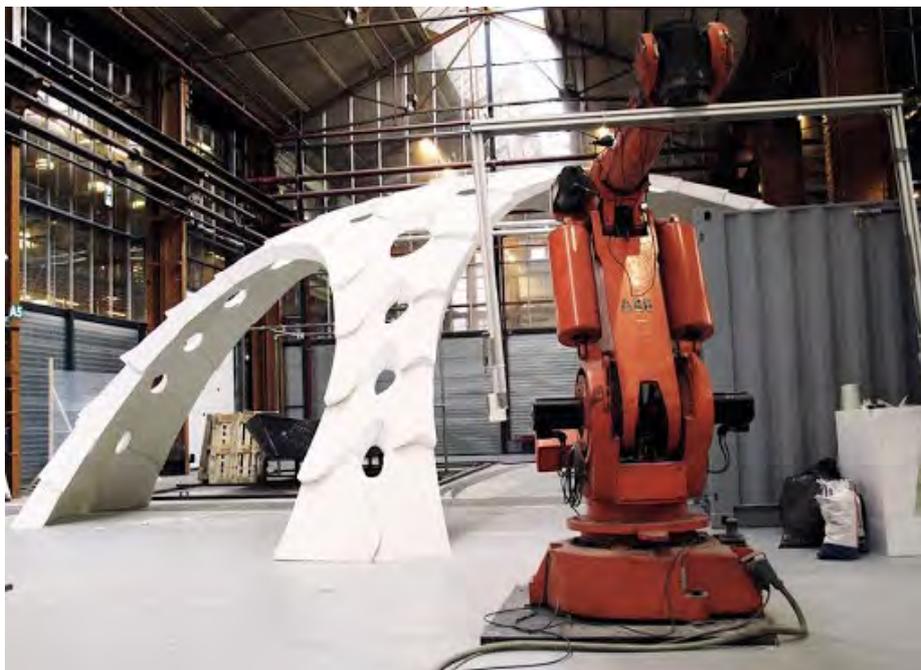


Рис. 21. Многоосевая роботизированная рука на производстве павильона

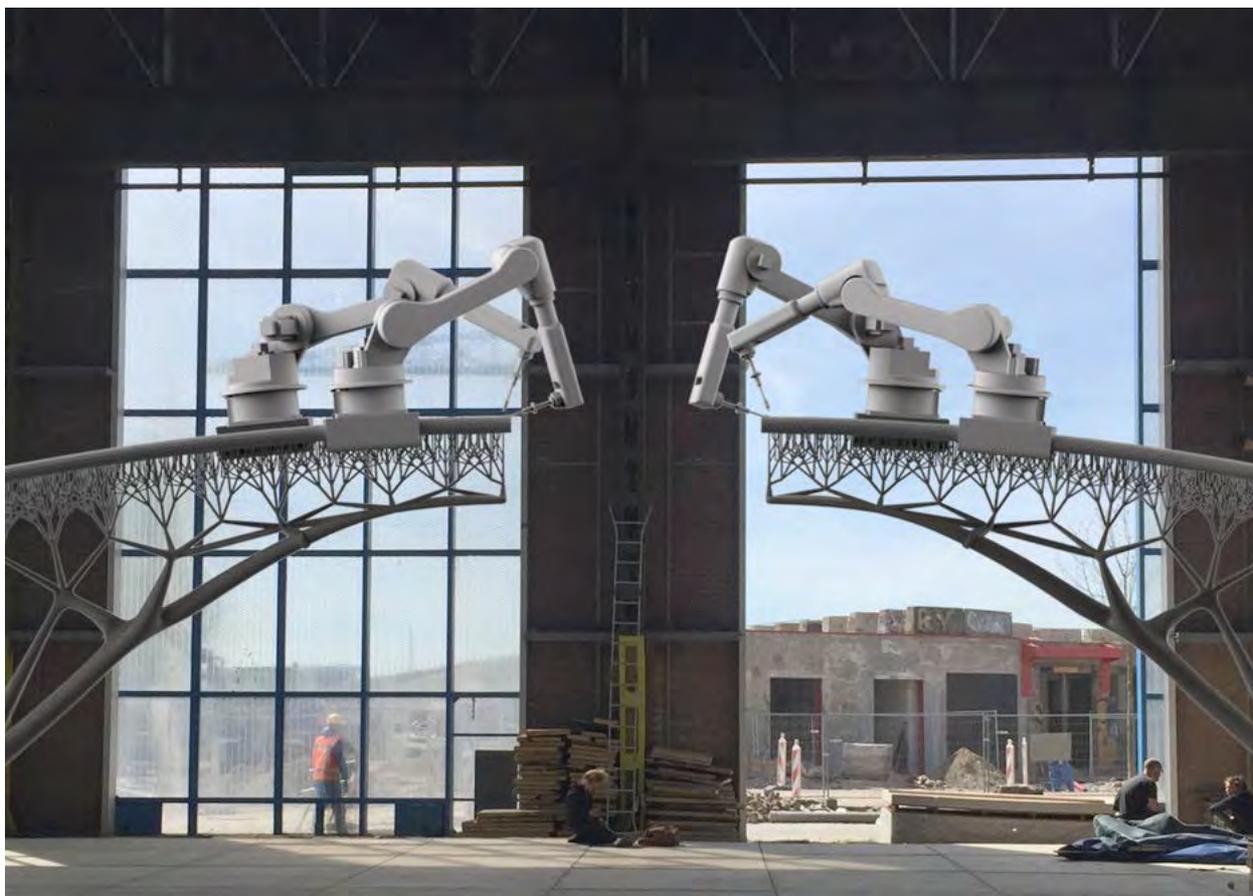


Рис. 22. Возведение моста при помощи 3D-принтера, команда MX3D, Амстердам



Рис. 23. Возведение павильона при помощи многоосевой роборуки, Университет Штутгарта



Рис. 24. Античный амфитеатр Одеон, Греция



Рис. 25. Подвесная модель собора Саграда Фамилия А. Гауди

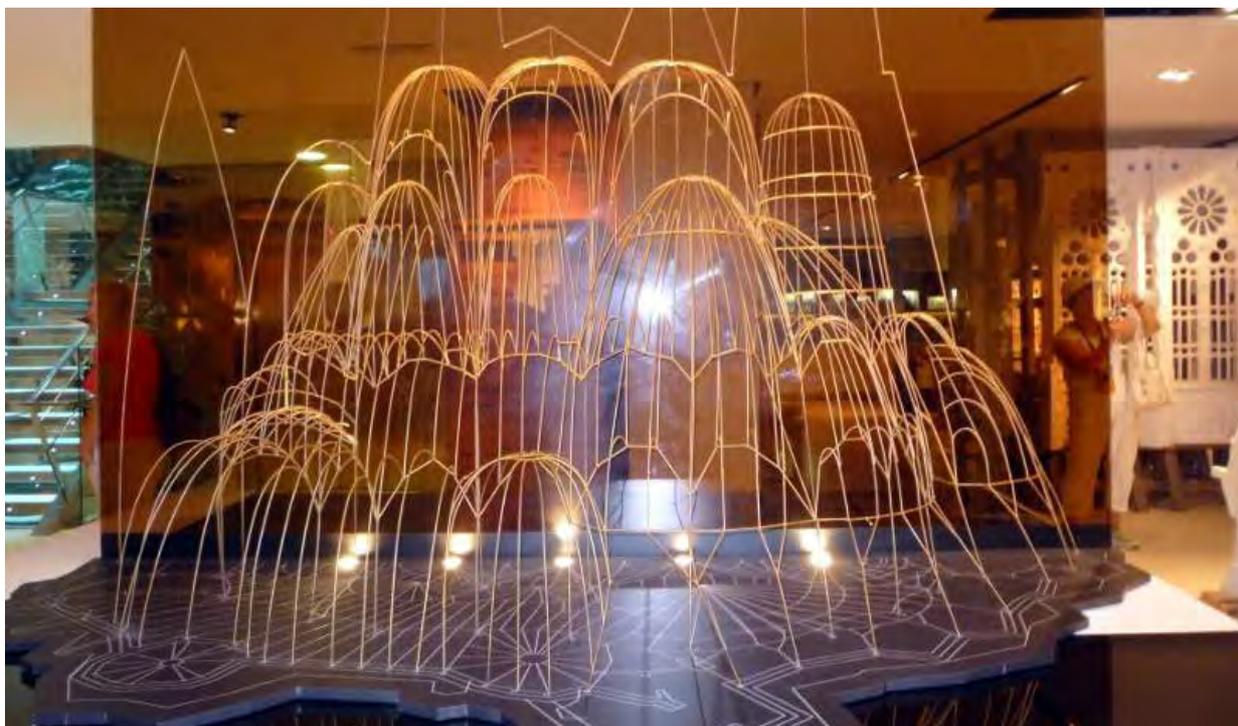


Рис. 26. Перевернутая подвесная модель собора Саграда Фамилия (без грузиков) А. Гауди

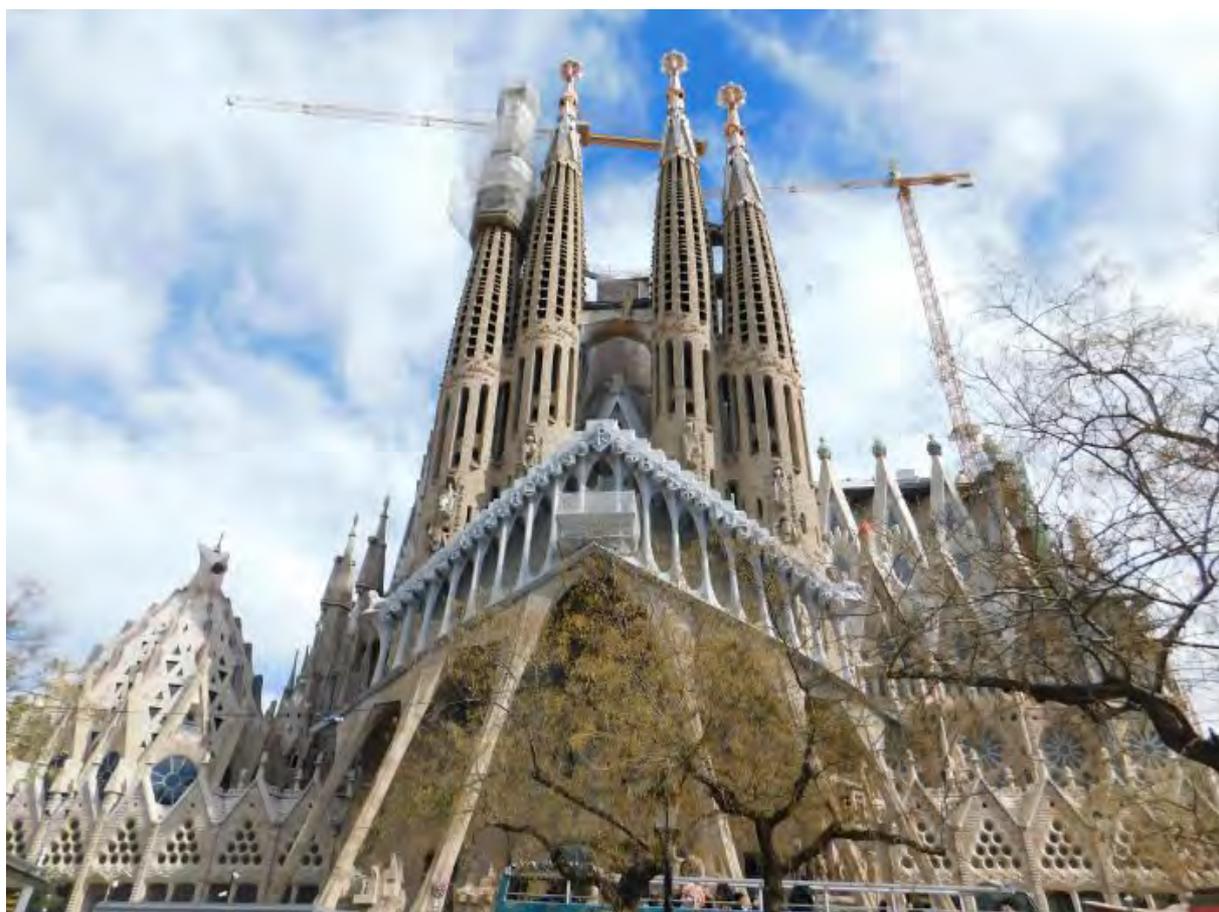


Рис. 27. Собор Саграда Фамилия А. Гауди, Барселона

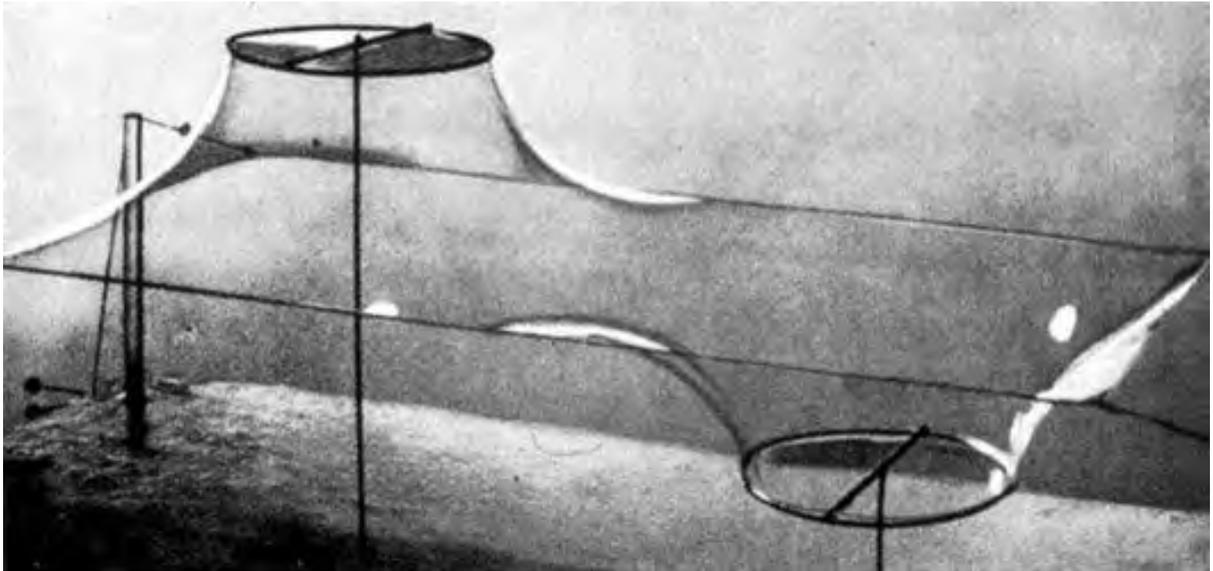


Рис. 28. Эксперименты Ф. Отто с мыльными пузырями при поиске формы



Рис. 29. Олимпийский стадион в Мюнхене 1972 года

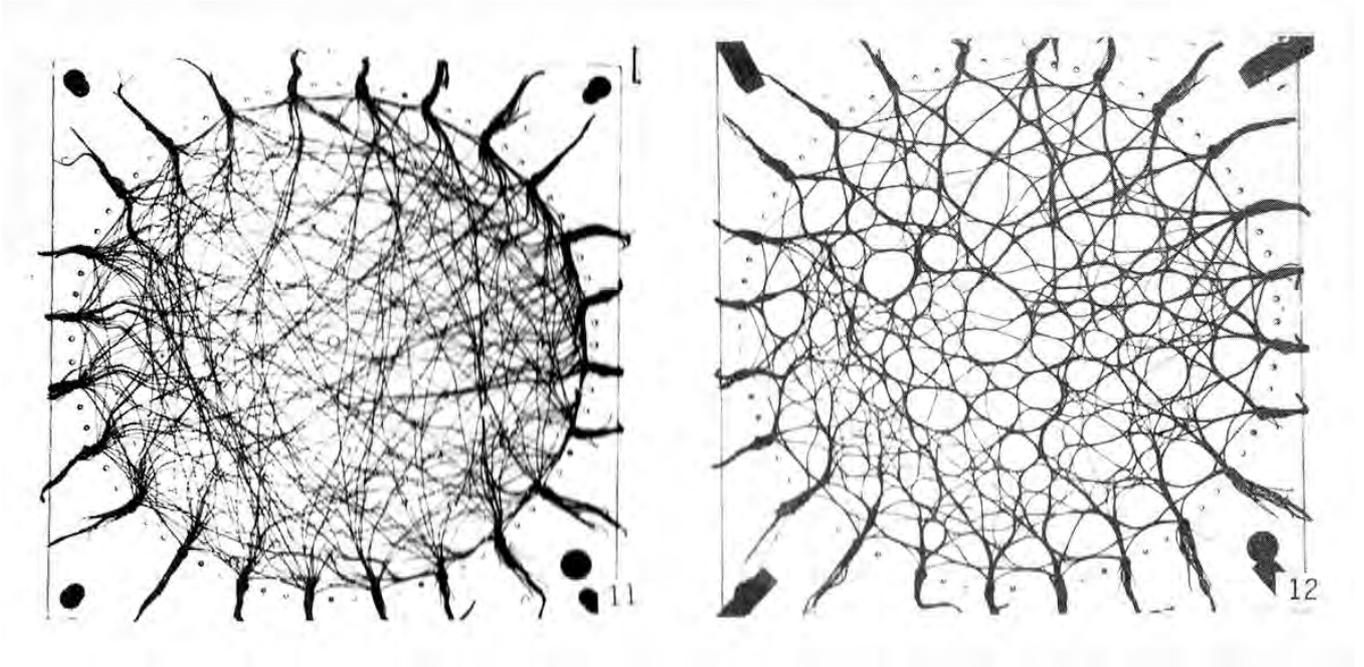


Рис. 30. Эксперименты Ф. Отто с нитями (слева – натянутые нити, справа – нити, опущенные в воду)

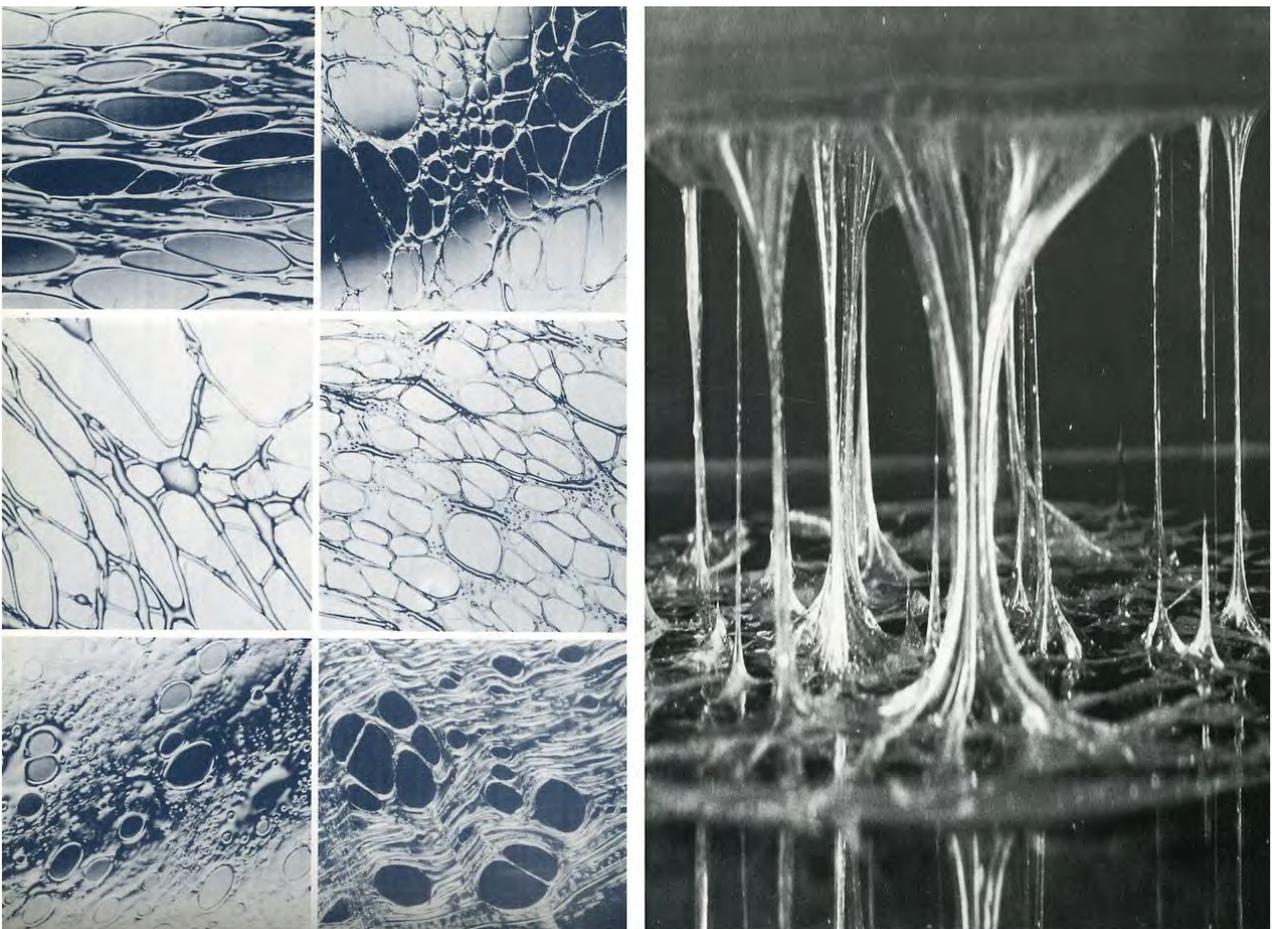


Рис. 31. Эксперименты Ф. Отто с клеем и тканью



Рис. 32. Эксперименты Ф. Отто с песком

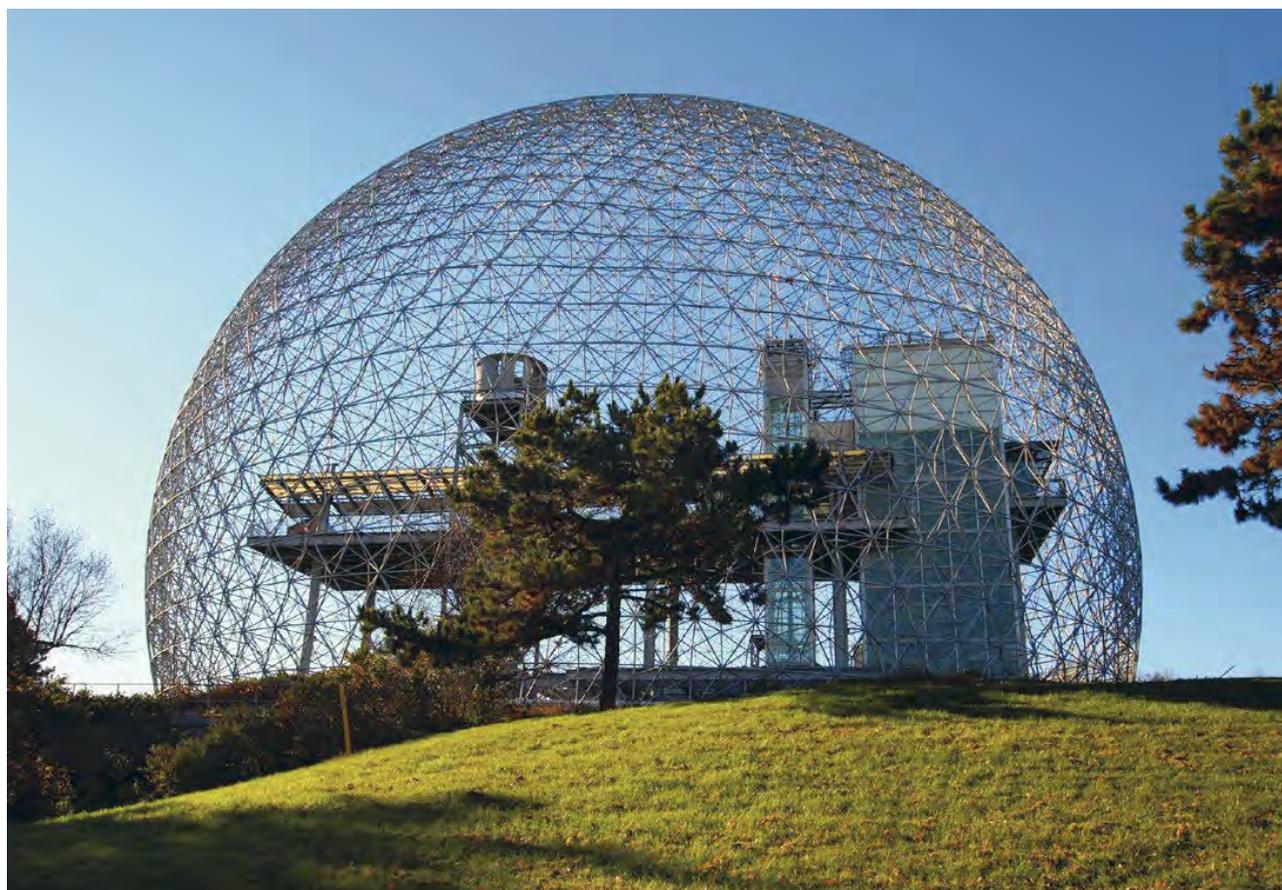


Рис. 33. Геодезический купол Б. Фуллера



Рис. 34. Большой двор Британского музея – реконструкция, Н. Фостер

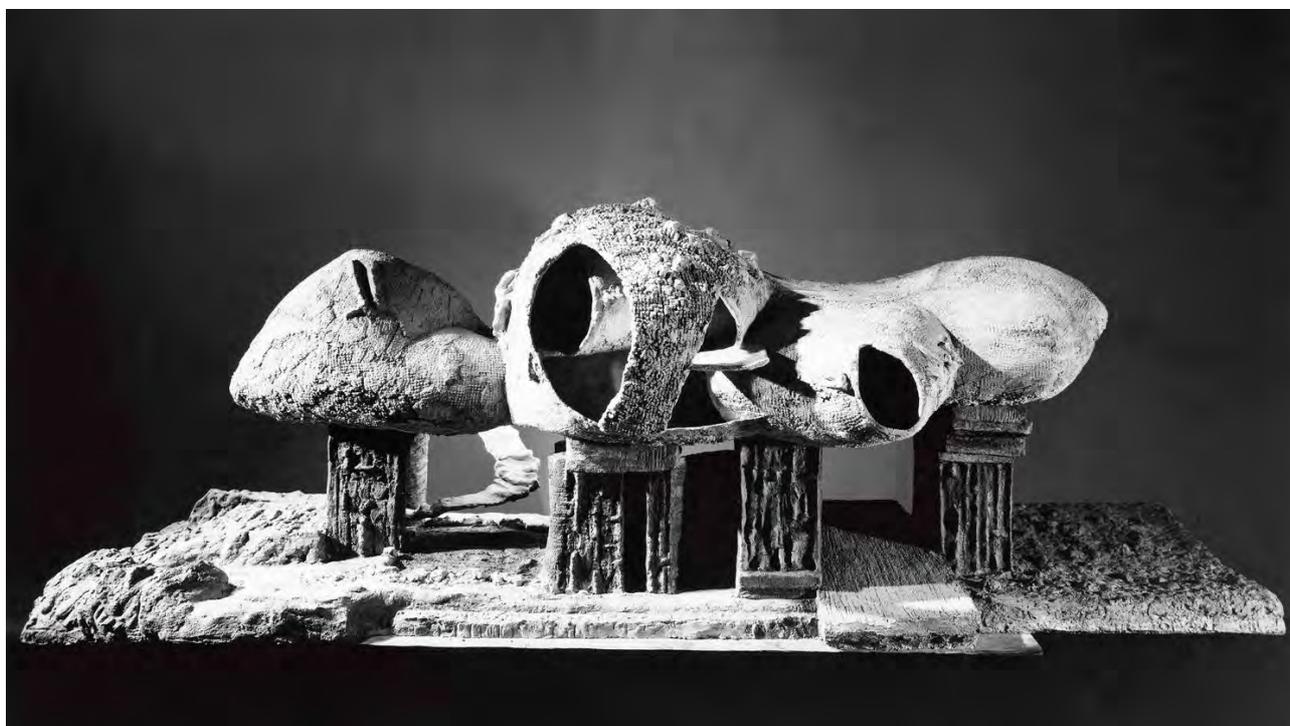


Рис. 35. Макет бесконечного дома Ф. Кислера

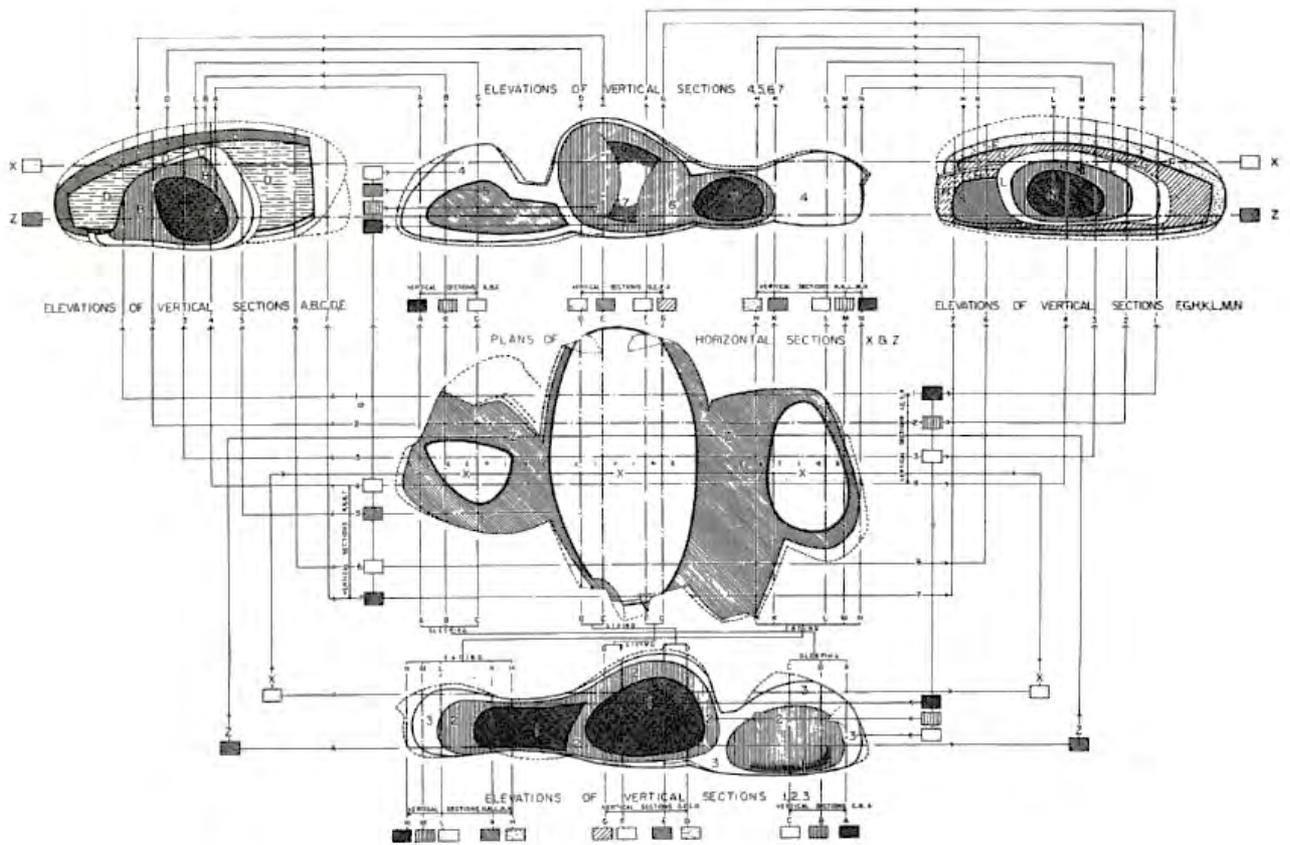


Рис. 36. Чертеж бесконечного дома Ф. Кислера

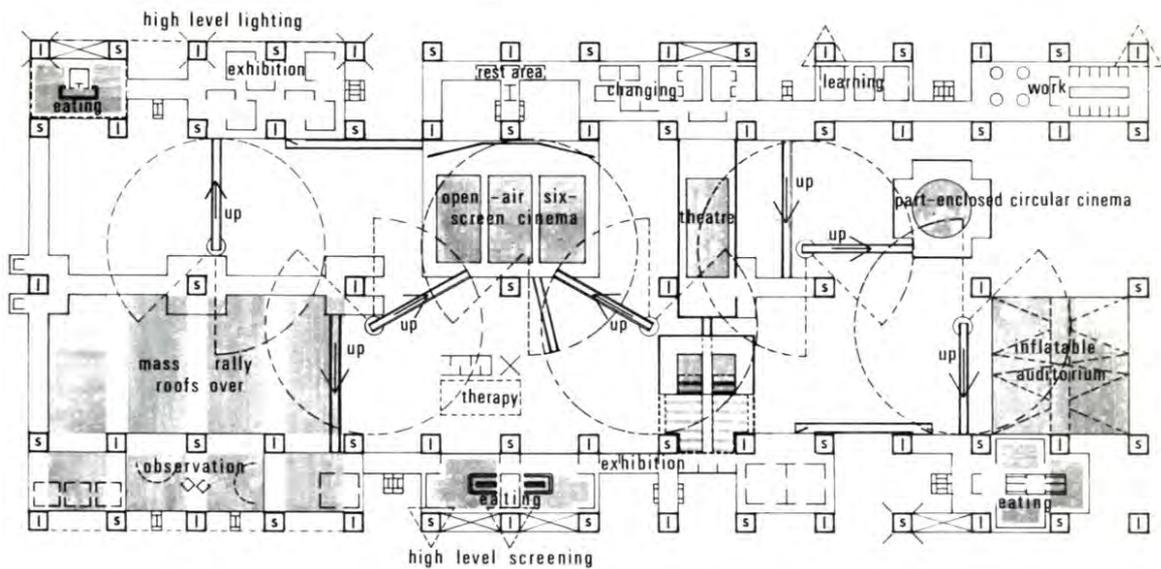


Рис. 37. Проекция плана проекта Дворца Развлечений С. Прайса

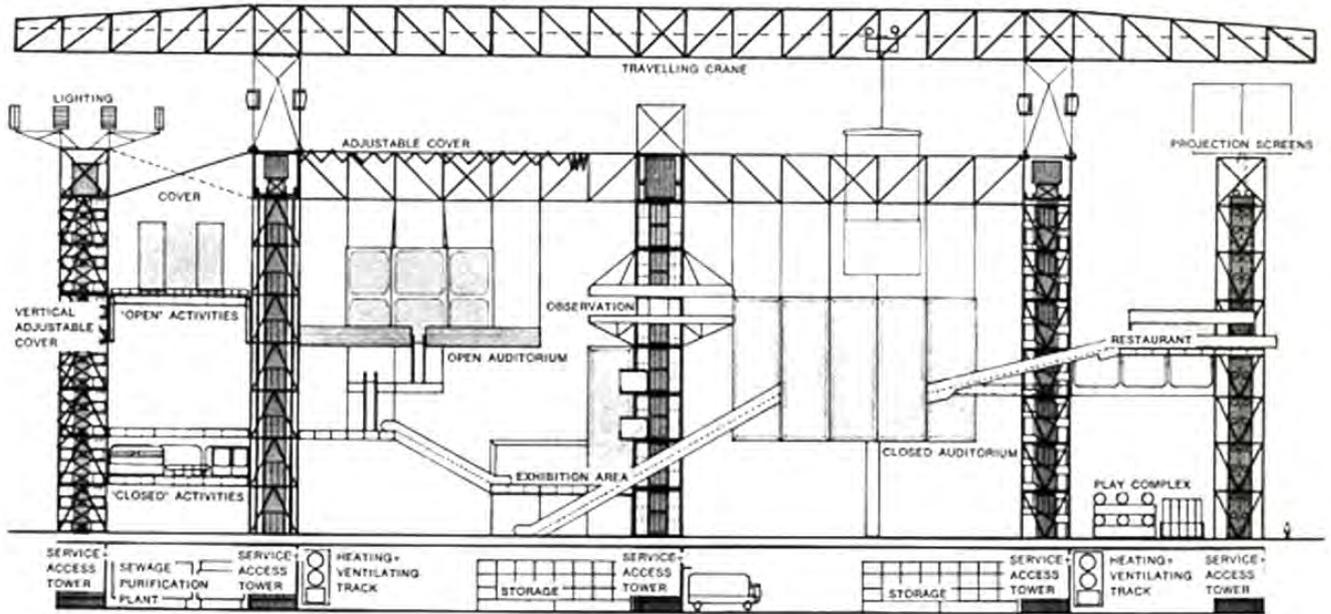


Рис. 38. Проекция разреза проекта Дворца Развлечений С. Прайса

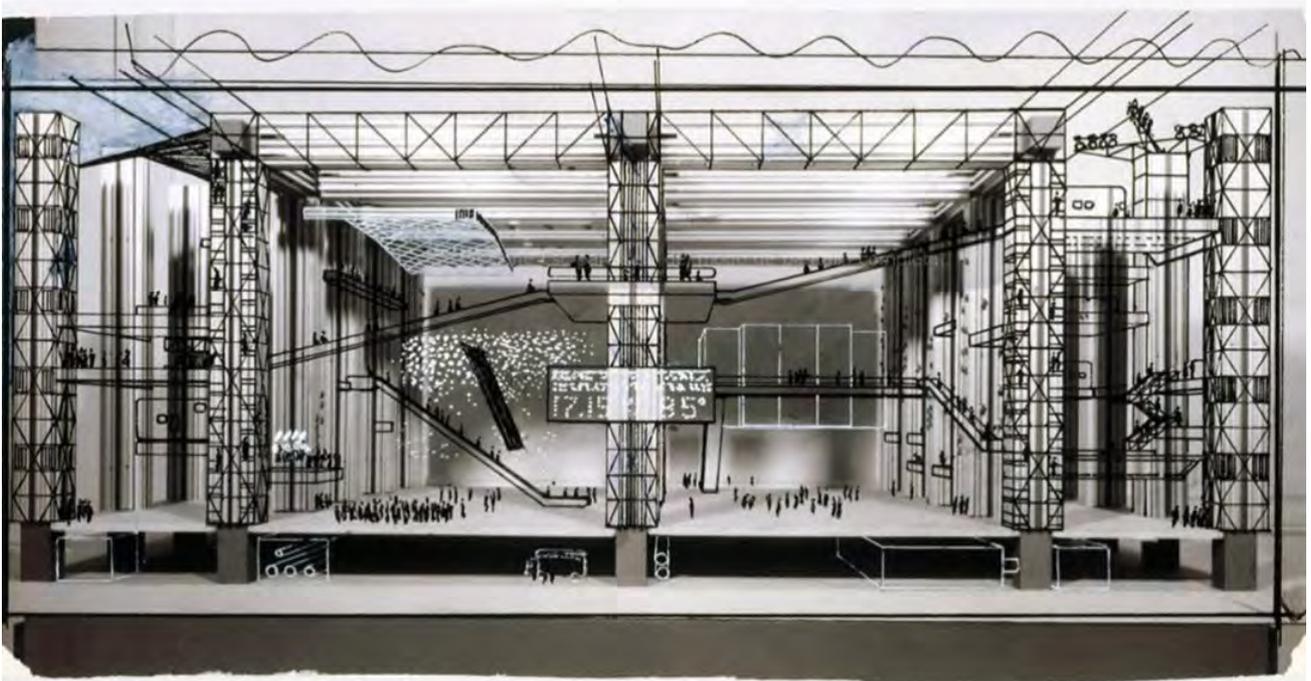


Рис. 39. Проект Дворца Развлечений С. Прайса



Рис. 40. Концертный зал Уолта Диснея в Лос-Анджелесе, Ф. Гэри

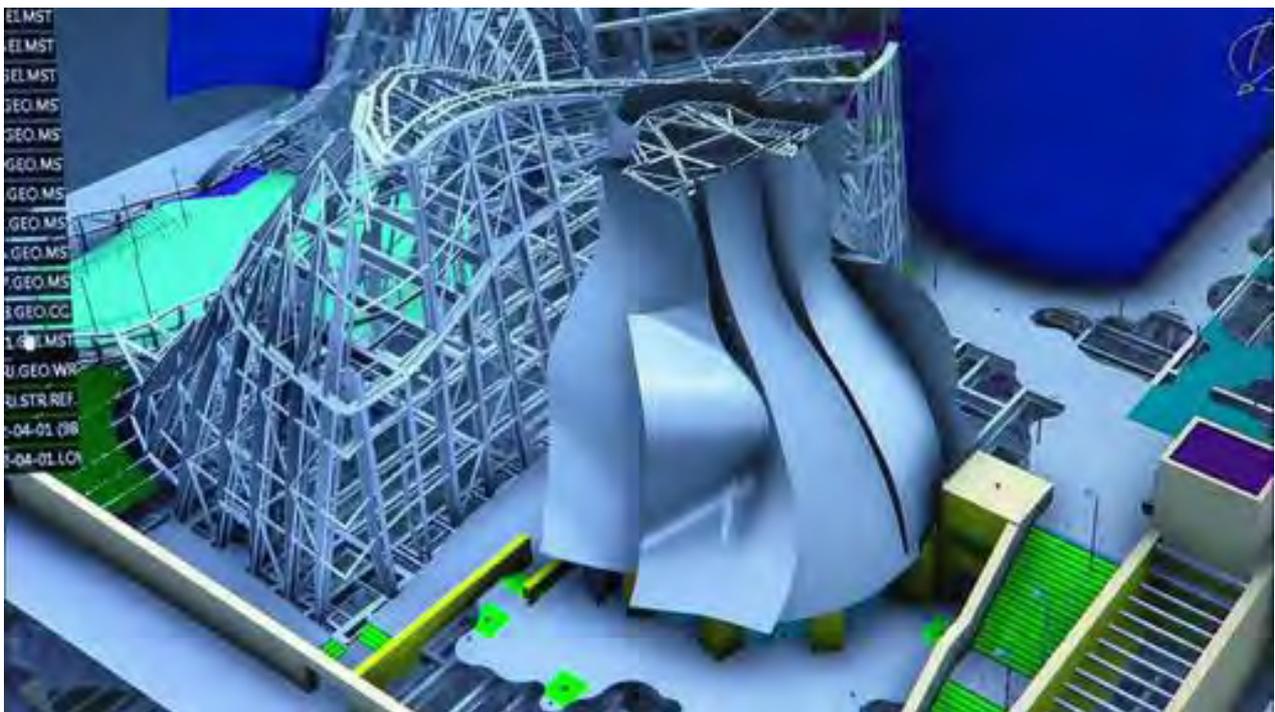


Рис. 41. Модель концертного зала У. Диснея в программе Gehry Technologies

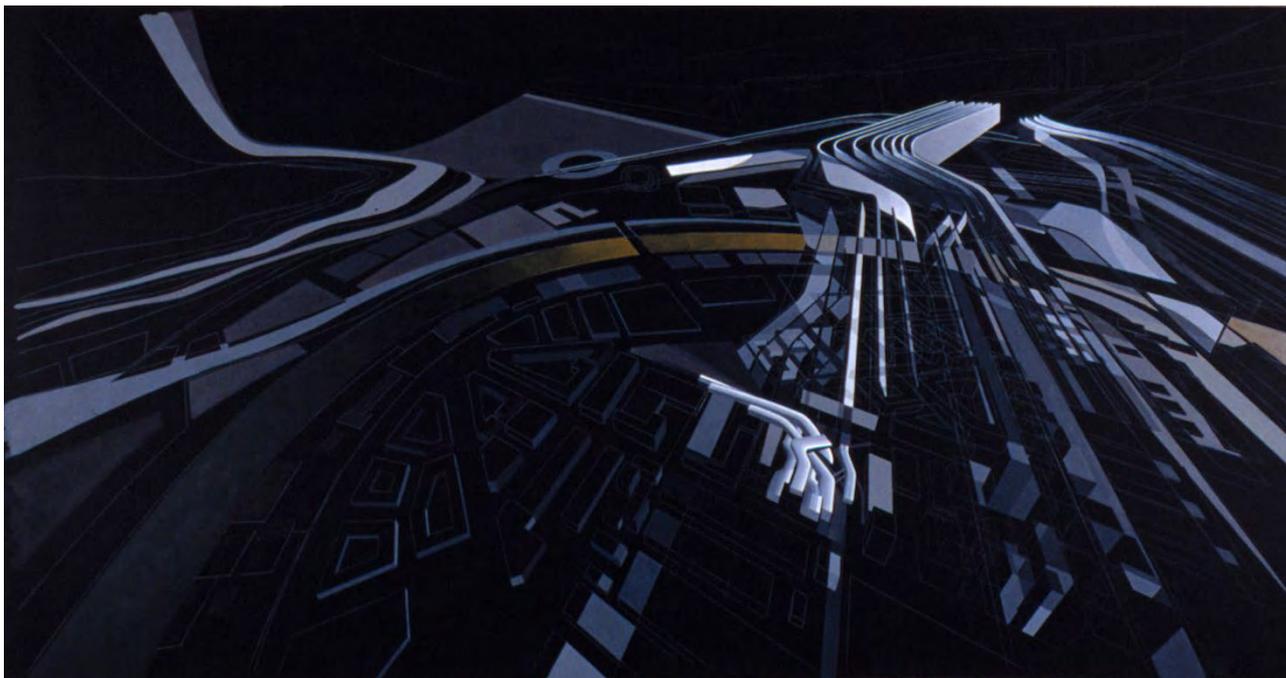


Рис. 42. Эскиз музея креативных процессов, З. Хадид

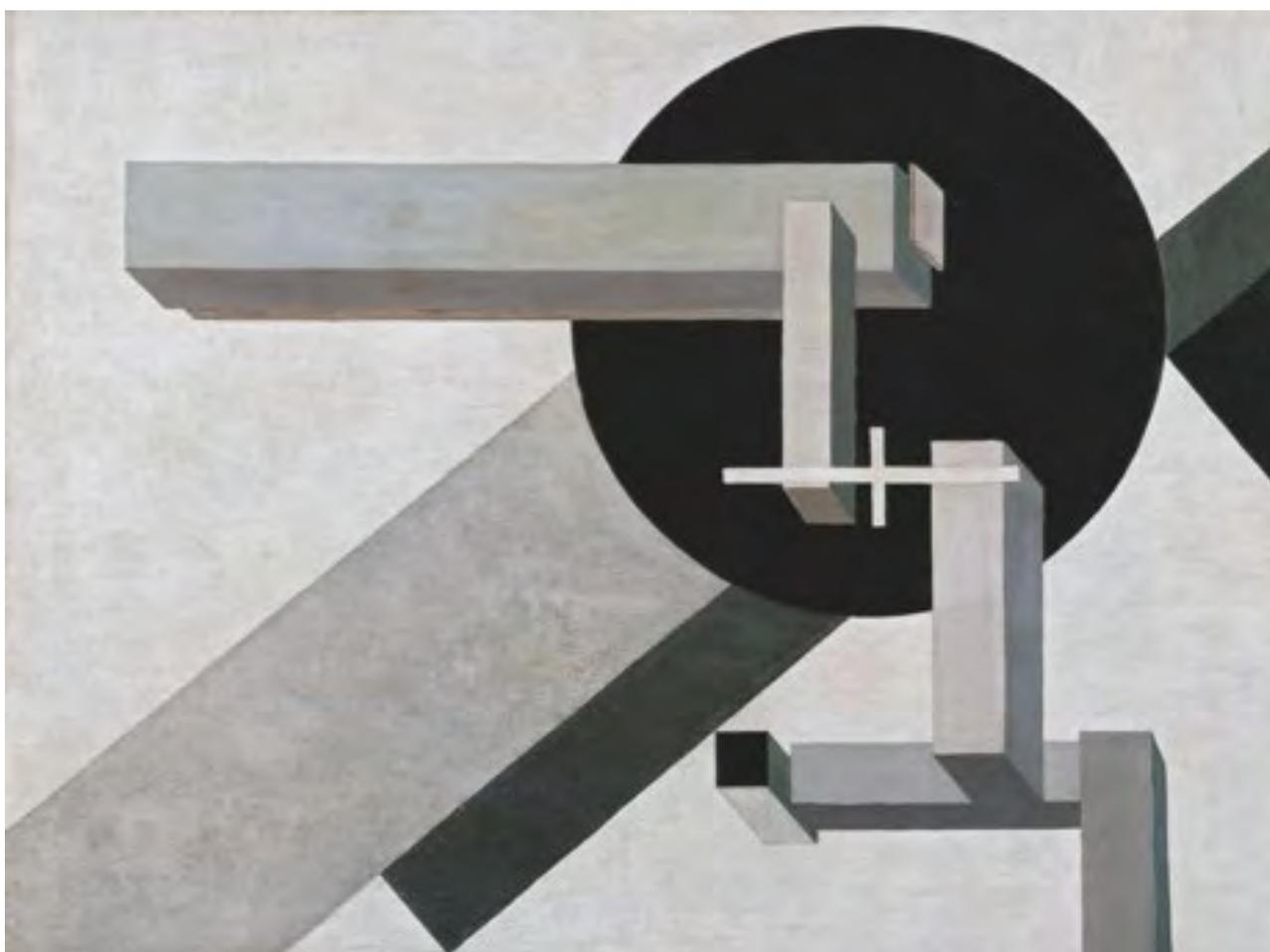


Рис. 43. Композиция проун 1D. 1919. Э. Лисицкий



Рис. 44. Арабская каллиграфия

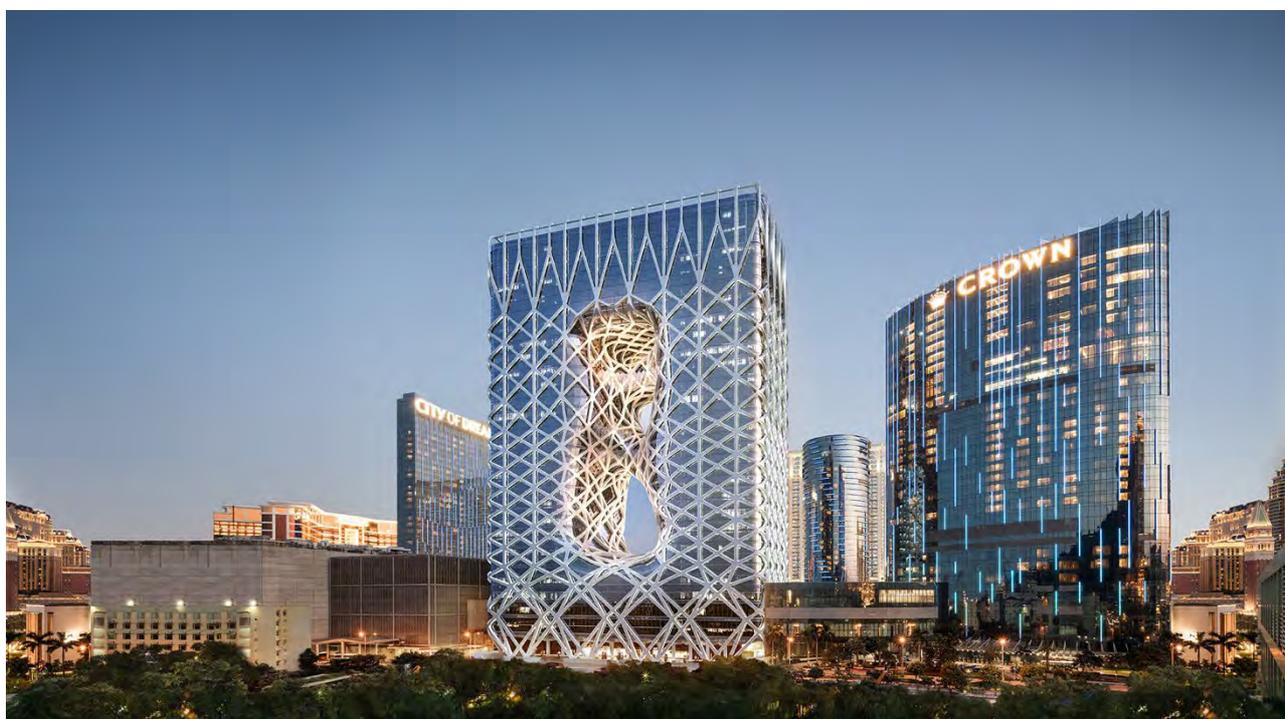


Рис. 45. Отель Morphosis в Макао, Китай, Zaha Hadid Architects

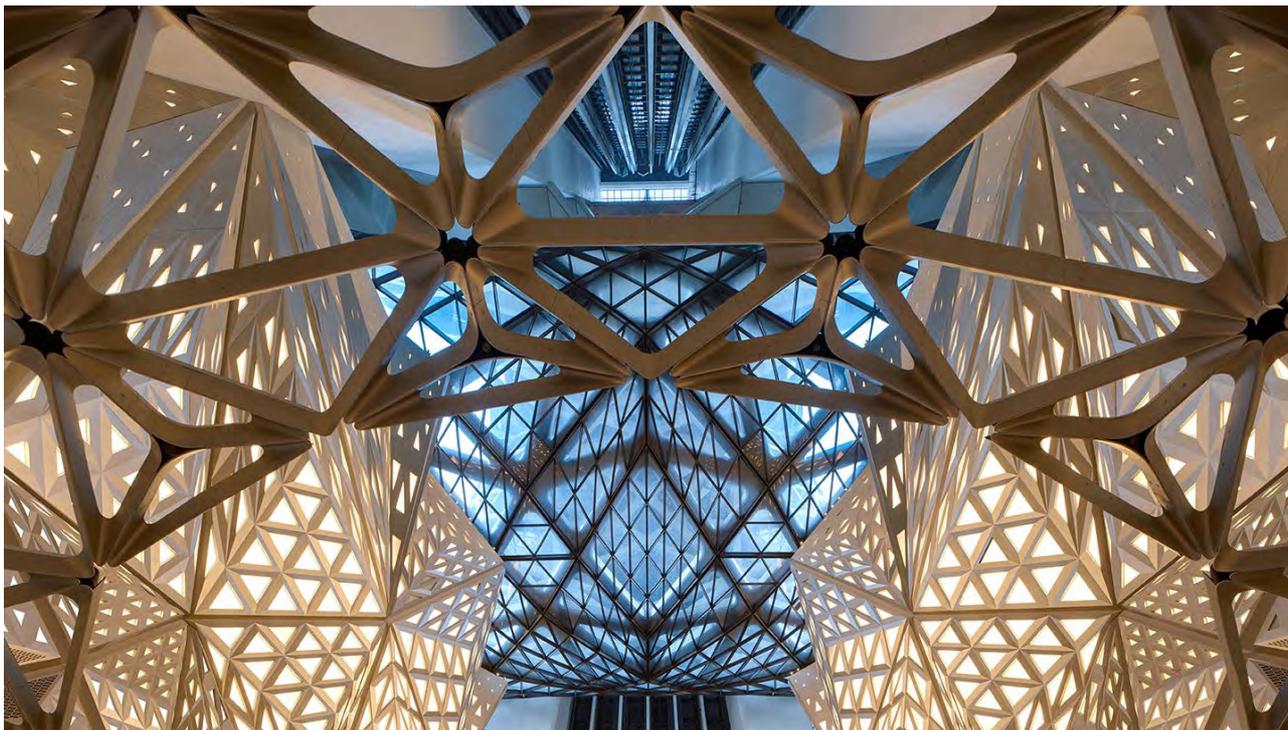


Рис. 46. Интерьер отеля Morphosis в Макао, Китай, Zaha Hadid Architects



Рис. 47. Здание национального театра в Тайване, Т. Ито



Рис. 48. Процесс строительства национального театра в Тайване, Т. Ито



Рис. 49. Проект Национального конференц-центра в Дохе, А. Исодзаки. 2011

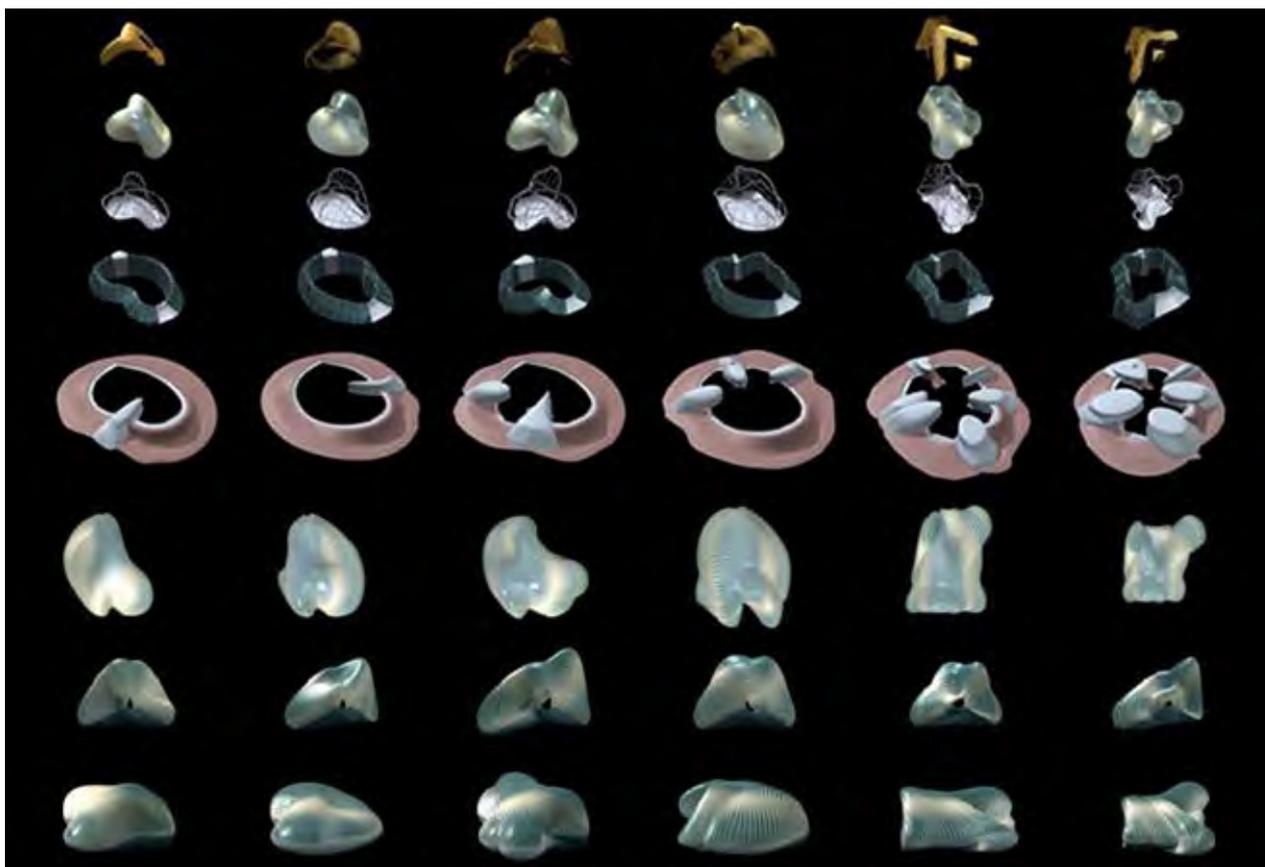


Рис. 50. Процесс формообразования проекта эмбриологического дома, Г. Линн

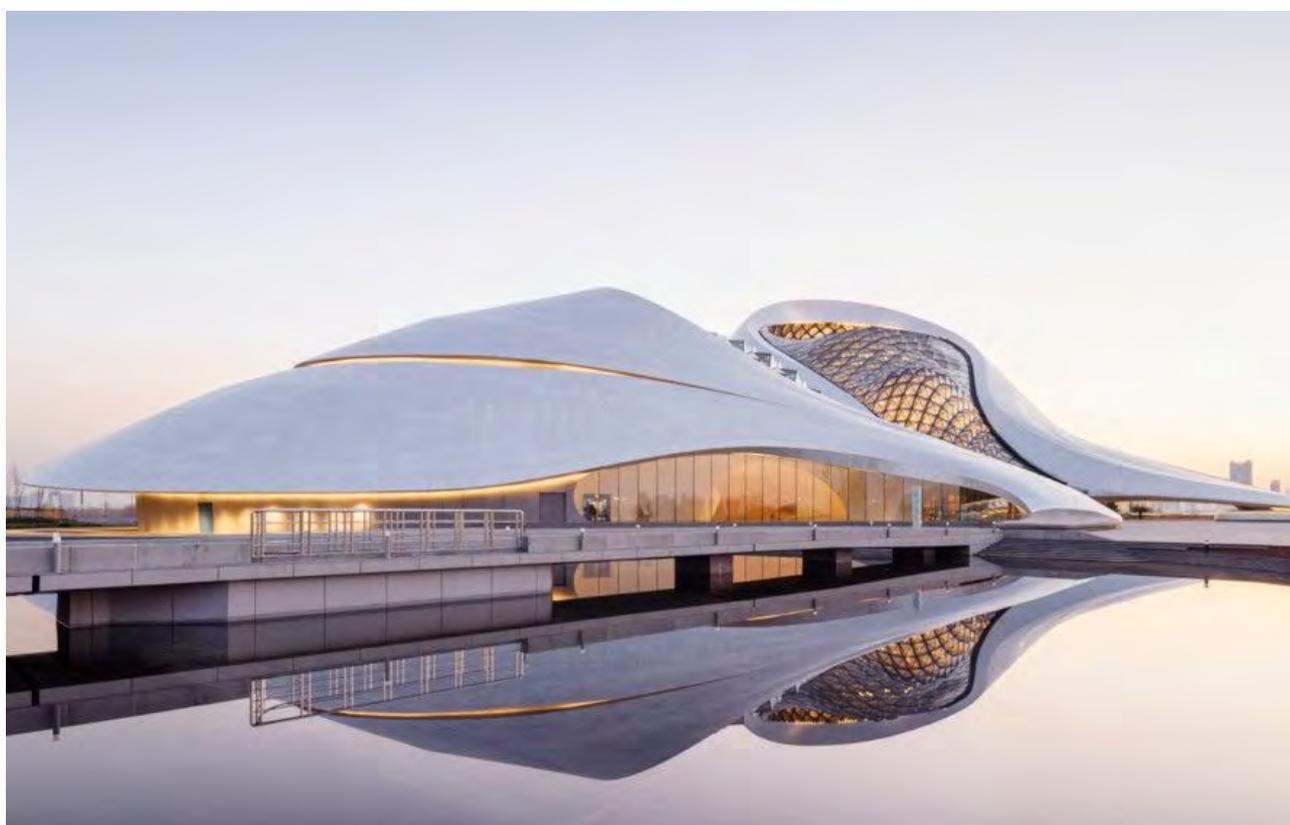


Рис. 51. Оперный театр в Харбине (Китай), MAD Architects

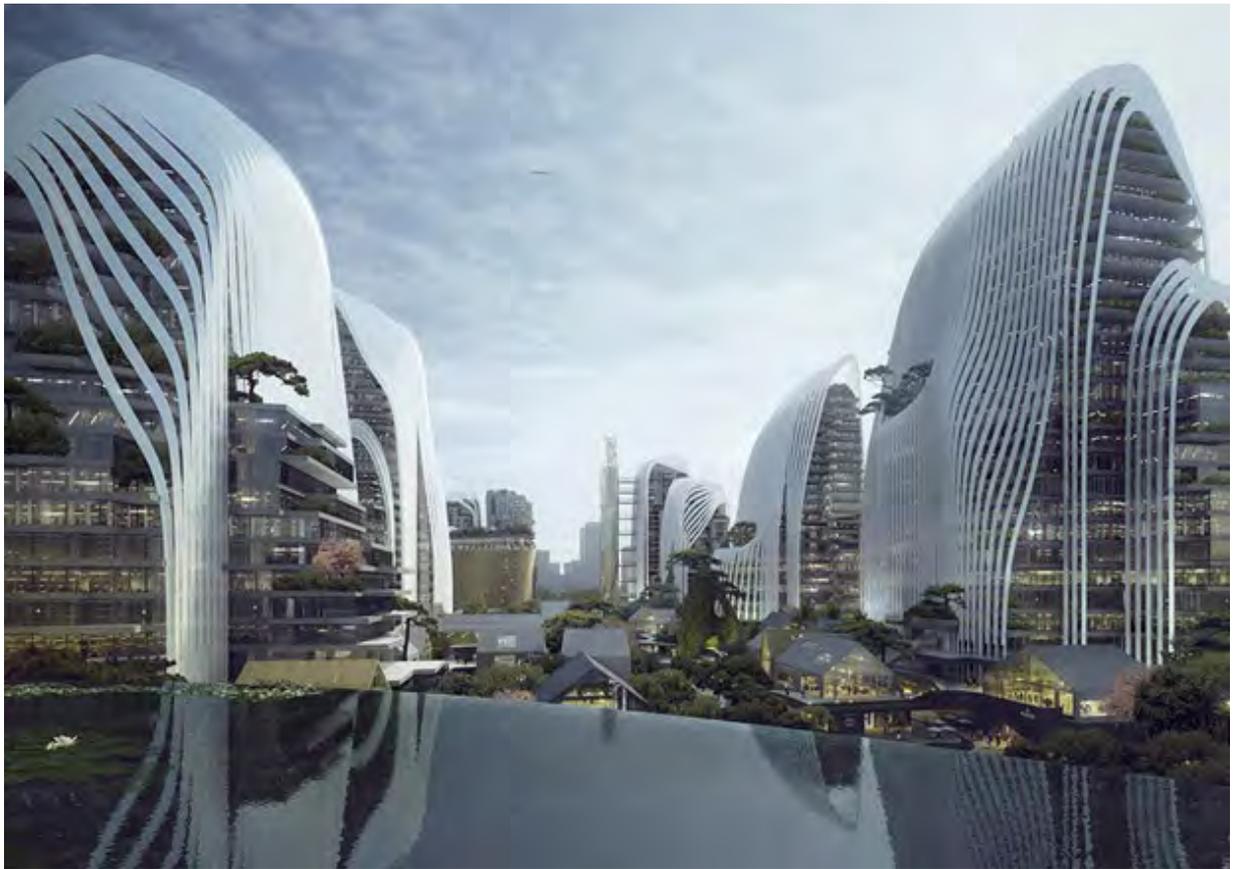


Рис. 52. Проект Центра Гималаев Нанкин Зендай, MAD Architects

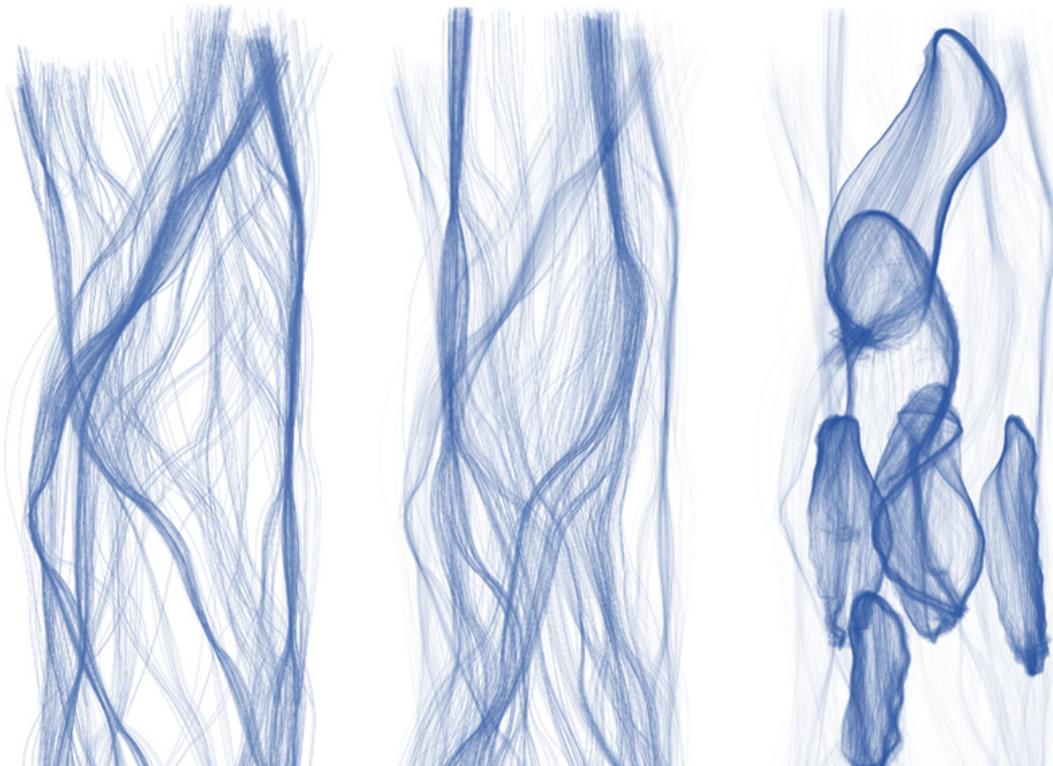


Рис. 53. Эксперименты архитектурного бюро Kokkugia в цифровом проектировании



(a)



(b)

Рис. 54. Проект национального музея в Китае (конкурс):
а – общий вид, б – интерьер



Рис. 55. Проект Digital Grotesque, М. Хансмейер

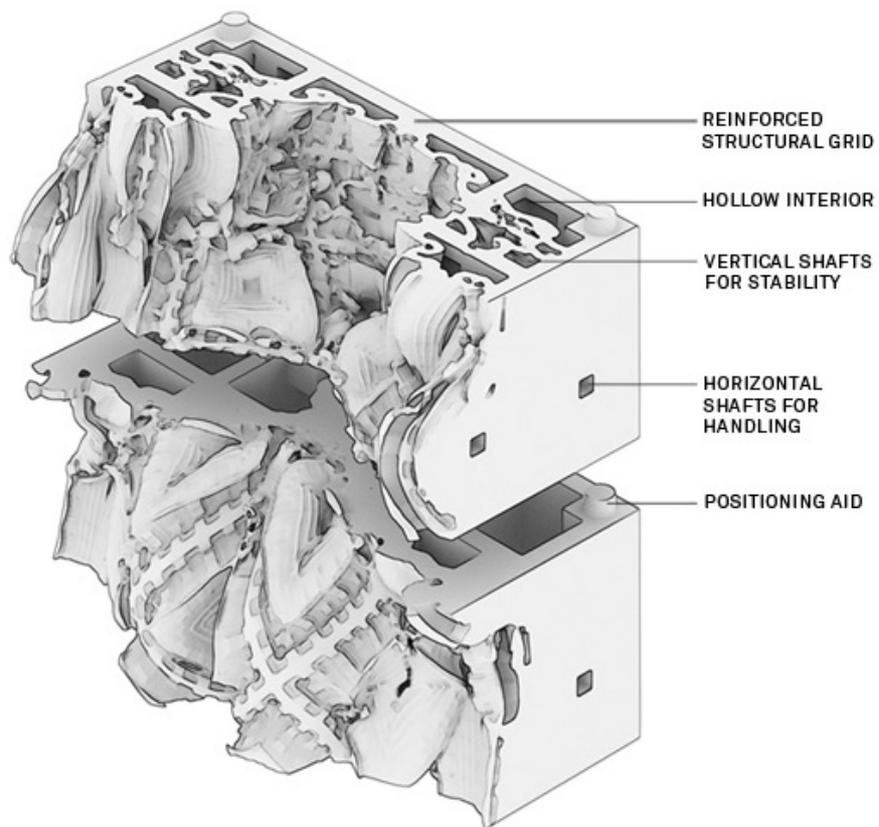


Рис. 56. Схема частей проекта Digital Grotesque, М. Хансмейер



Рис. 57. Оптимизация узла конструкции, компания Arup, 2015

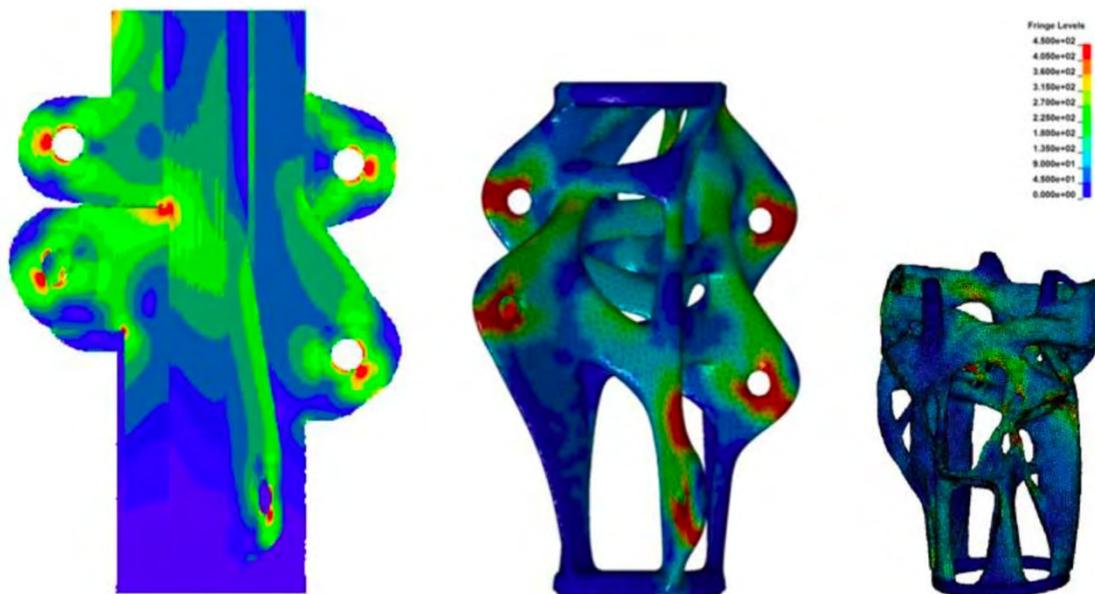


Рис. 58. Напряжение в [МПа], изначальная форма (слева), оптимизированный узел 1.0 (в центре) и новая форма узла оптимизация 2.0 (справа). Самые высокие напряжения отображаются красным, самые низкие – синим, компания Arup, 2015

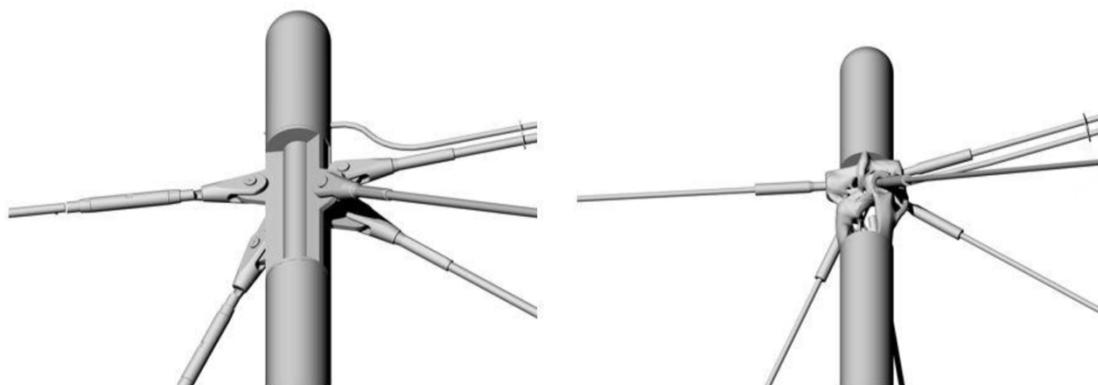


Рис. 59. Рендер традиционной конструкции (слева) и оптимизированный элемент 2.0 (справа), показывающий узлы на конце стойки с соединительными кабелями и осветительной арматурой, компания Agur



Рис. 60. Изображение оптимизированного узла из нержавеющей стали с присоединением резьбовых обжимных концов к кабелям, световая арматура и распорка отсутствуют, компания Agur, 2015



Рис. 61. Проект ProtoHouse от студии Softkill Design, 2012

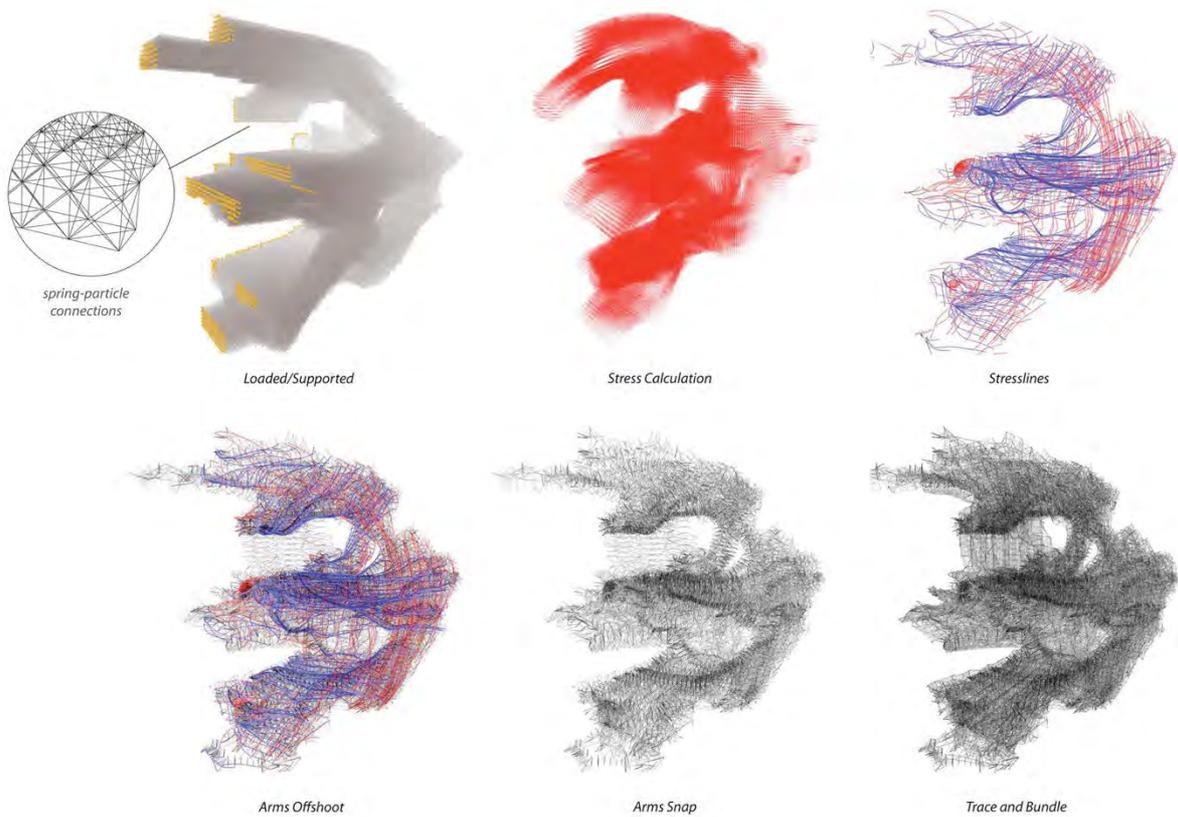


Рис. 62. Схемы структуры проекта ProtoHouse от студии Softkill Design, 2012



Рис. 63. Элементы макета проекта ProtoHouse от студии Softkill Design, 3D-принтер

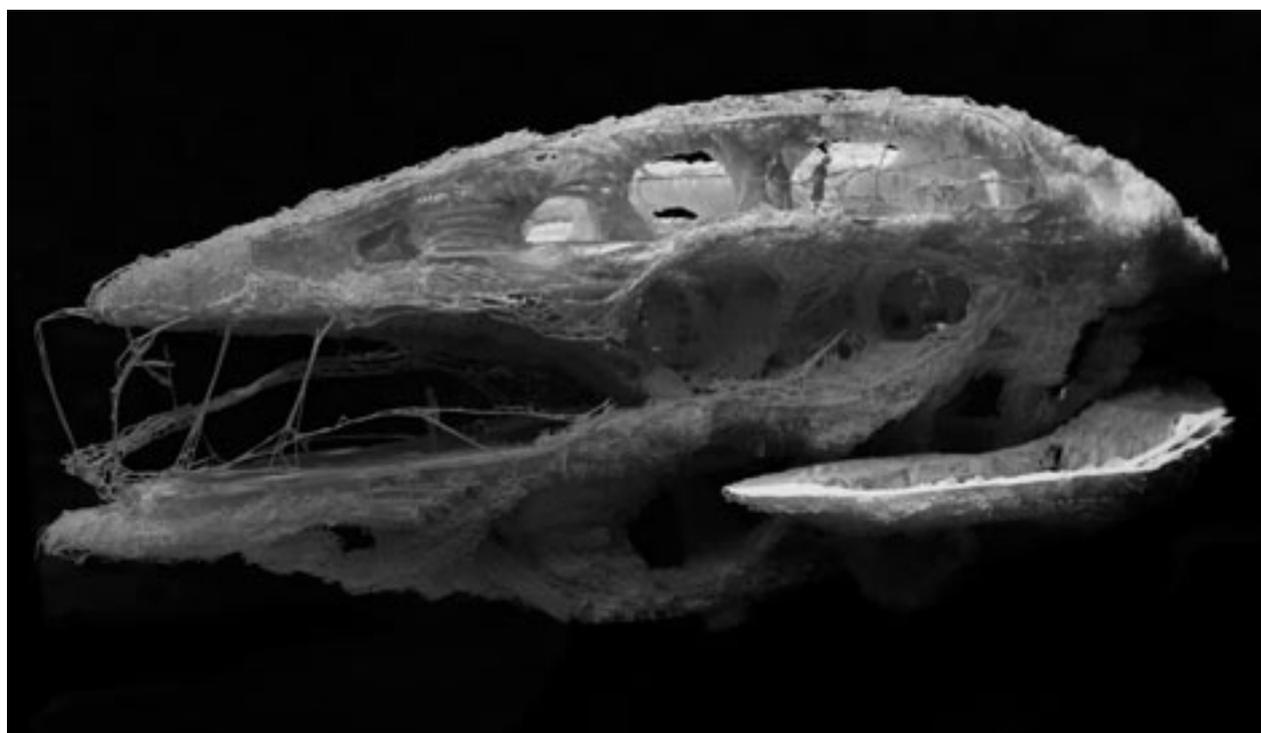


Рис. 64. Макет проекта ProtoHouse от студии Softkill Design, 3D-принтер

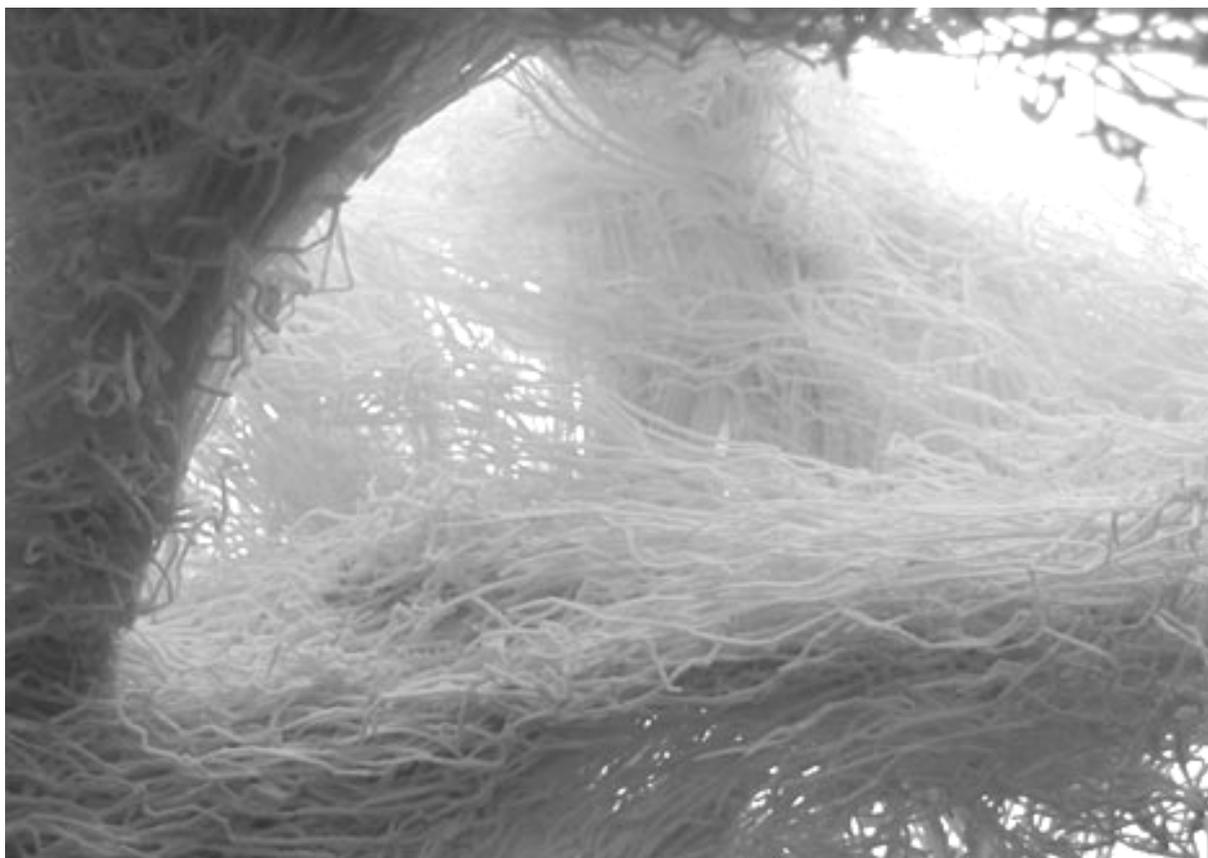


Рис. 65. Макет проекта ProtoHouse от студии Softkill Design, 3D-принтер



Рис. 66. Макет проекта ProtoHouse от студии Softkill Design, 2012, 3D-принтер



Рис. 67. Павильон Розенштейна в Штутгарте, Германии, бюро ILEK, 2015

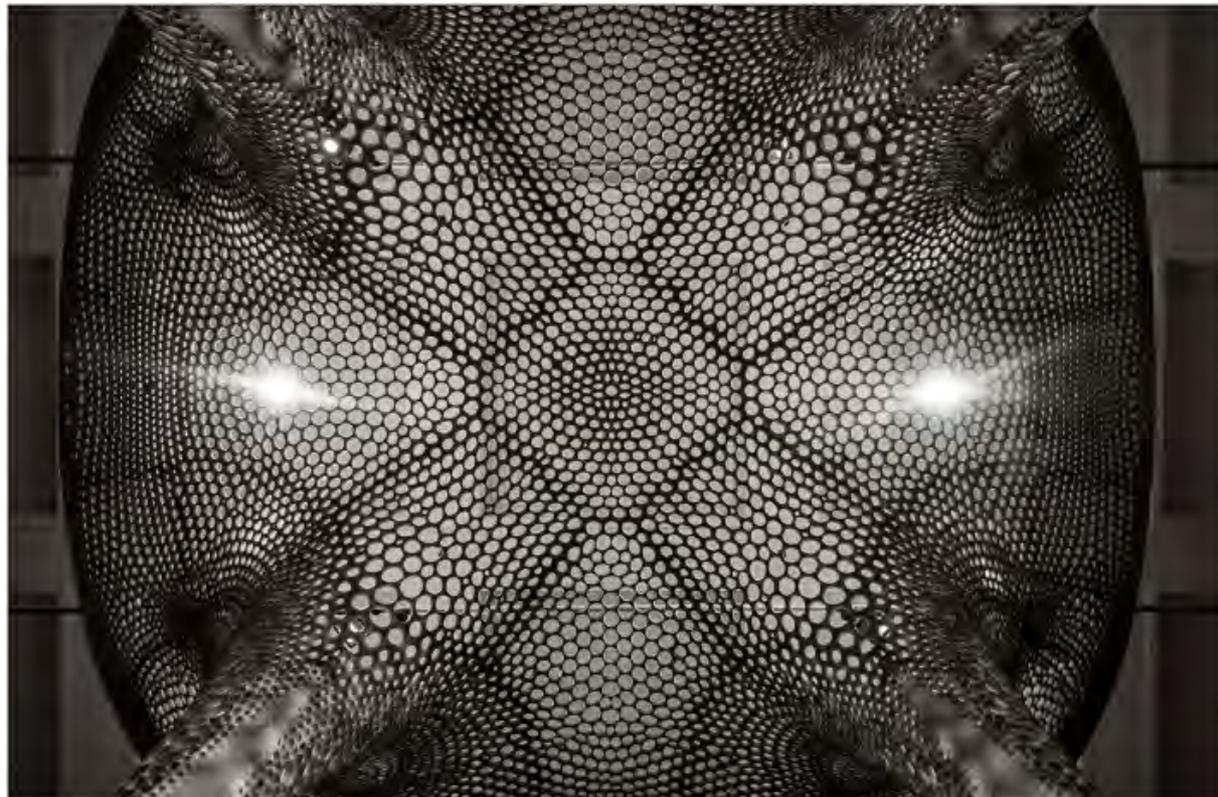


Рис. 68. Павильон Розенштейна в Штутгарте, Германии, бюро ILEK, 2015,
вид снизу

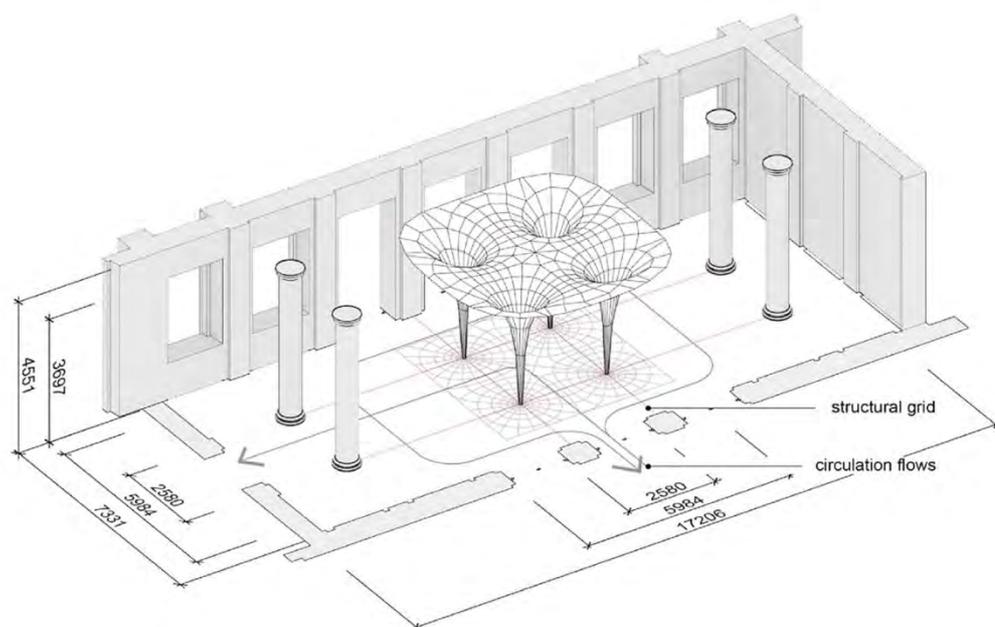


Рис. 69. Аксонометрический вид павильона Розенштейна в Штутгарте, Германии, бюро ПЛЕК, 2015

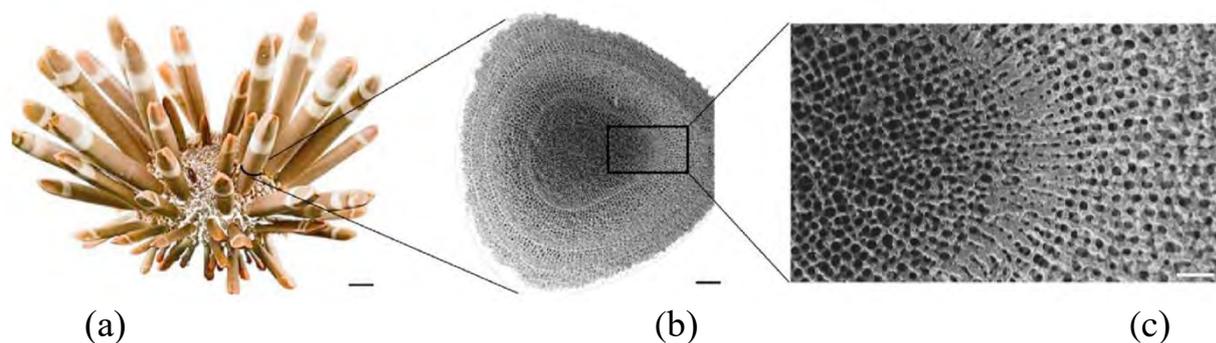


Рис. 70. Морской еж *Heterocentrotus mammillatus* (a), поперечное сечение позвоночника (b) и крупный план стереомной структуры (c), масштабная шкала = 1 мм. Источник: AMIN, Университет Тюбингена

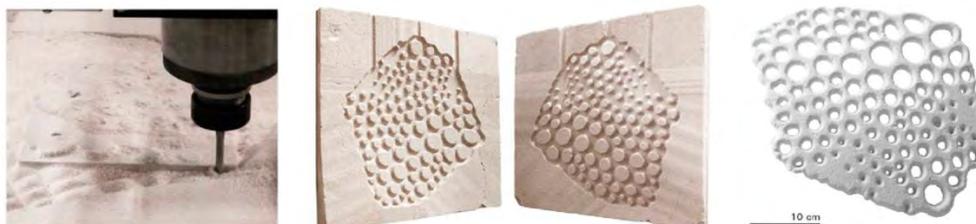


Рис. 71. Методы опалубки для геометрически сложных бетонных конструкций. Фрезерование опалубочной части, сборка двусторонней опалубки для литья, вид тонкостенного бетонного сегмента

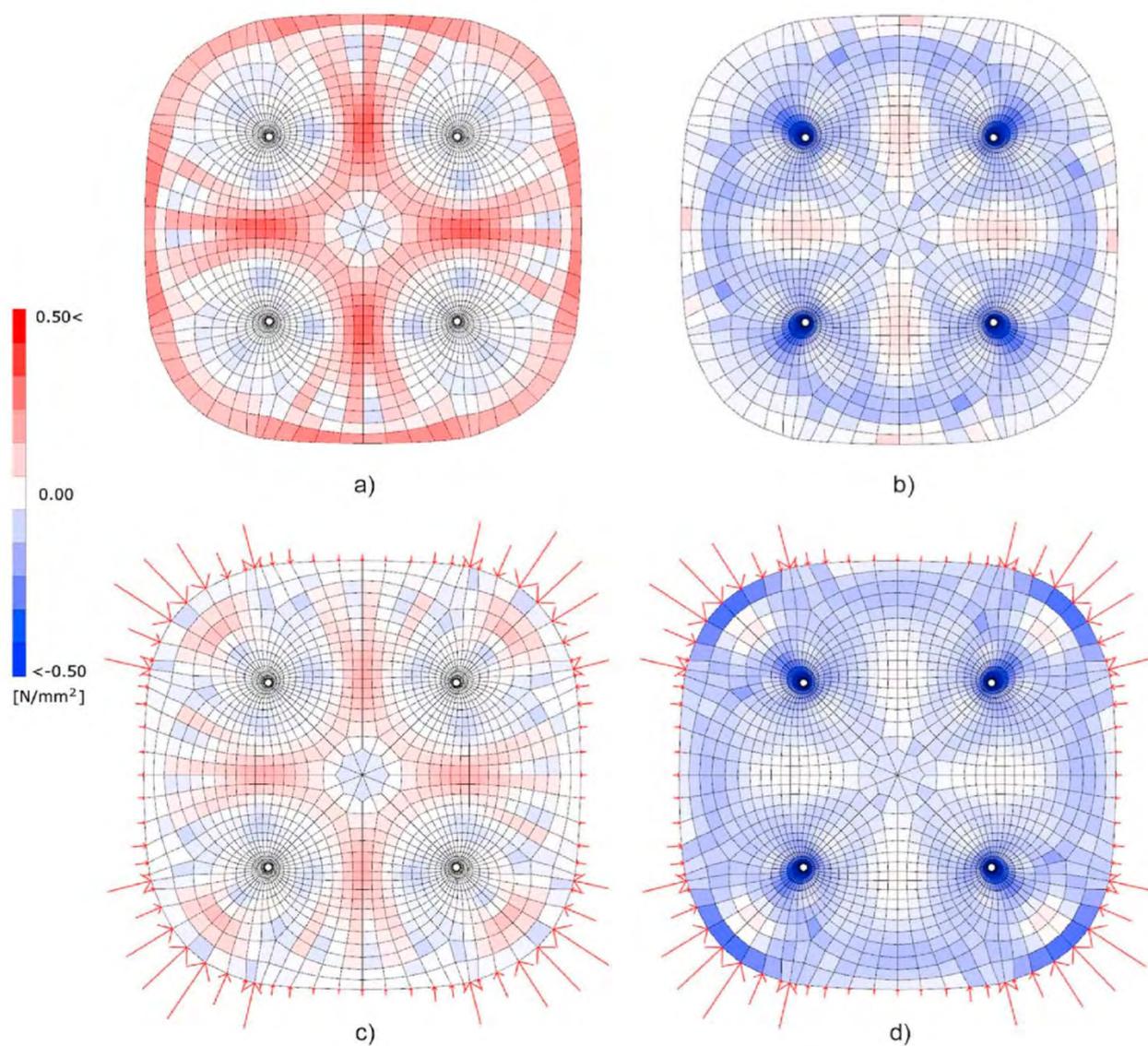


Рис. 72. Схема распределения максимального и минимального главных напряжений без натяжного кольца (а), (б) и с натяжным кольцом, с усилием предварительного напряжения $4,5 \text{ кН}$ (с), (д)

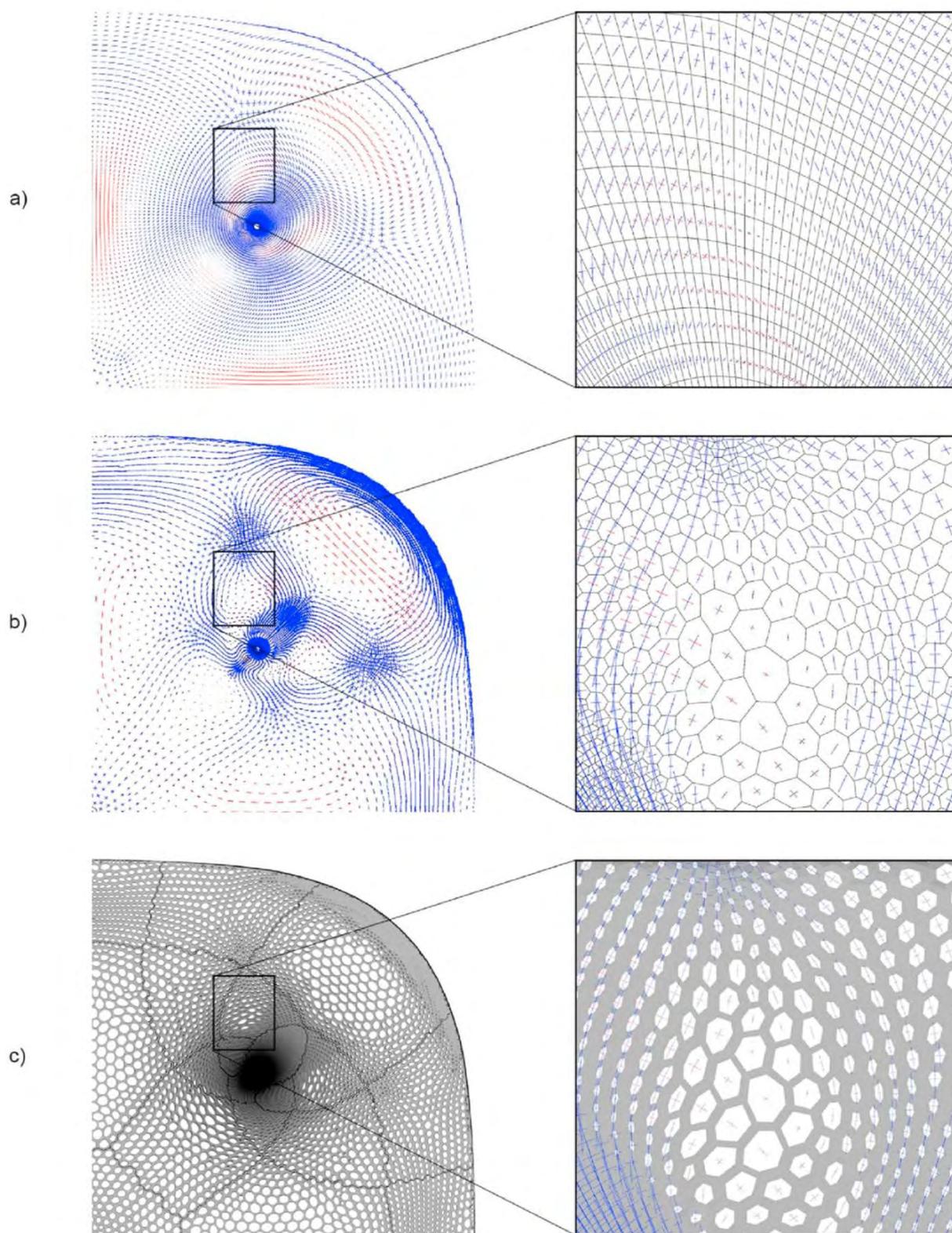


Рис. 73. Материализация поля напряжений оболочки. Начальная четырехугольная сетка с векторами напряжений (а), популяция клеток в соответствии с амплитудами и направлениями главных векторов напряжений (б), моделирование требуемых сечений в соответствии с величинами главных напряжений (с)

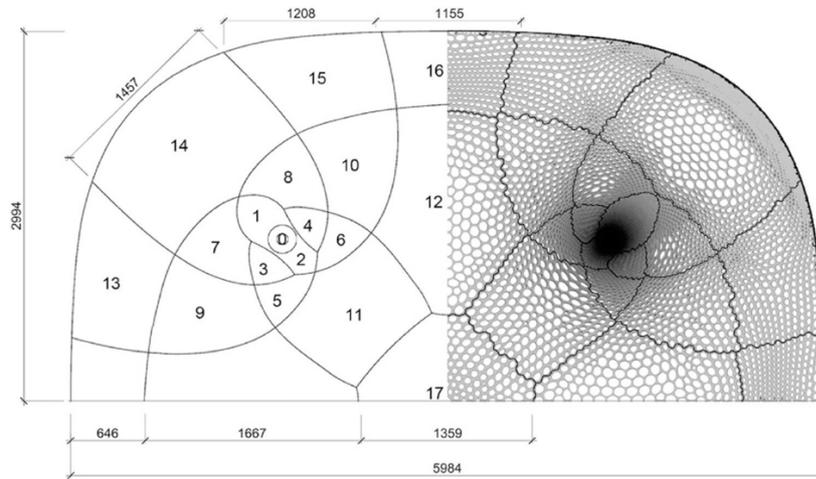


Рис. 74. Сегментация макета оболочки

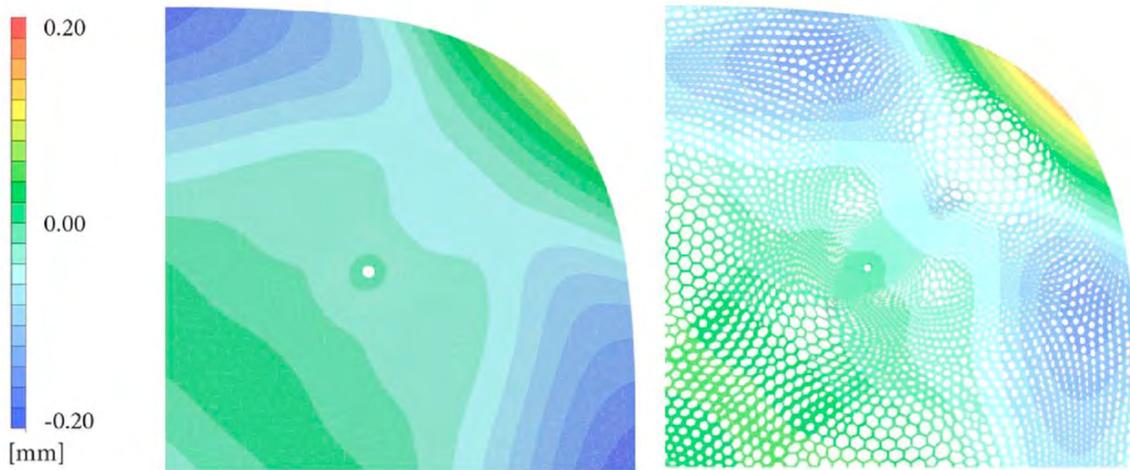


Рис. 75. Павильон Розенштейна, вертикальные смещения сплошных (a) и пористых (b) оболочек, бюро ИЛЕК, 2015

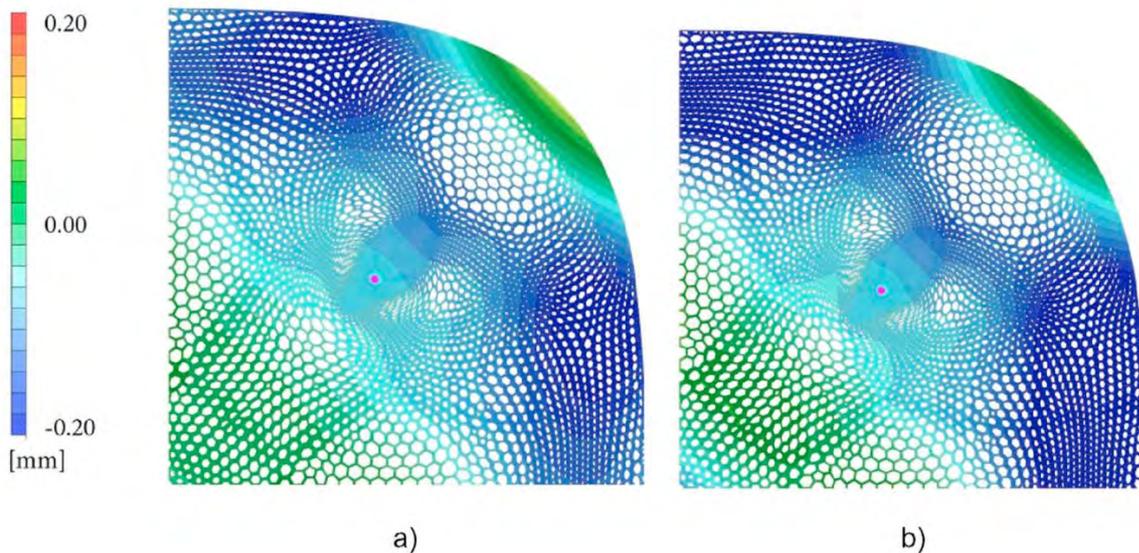


Рис. 76. Нелинейно вычисленные вертикальные смещения пористой сегментированной оболочки модели с полными контактными пружинами и металлическими крепежными элементами 50% (a) и 20% (b) соответственно

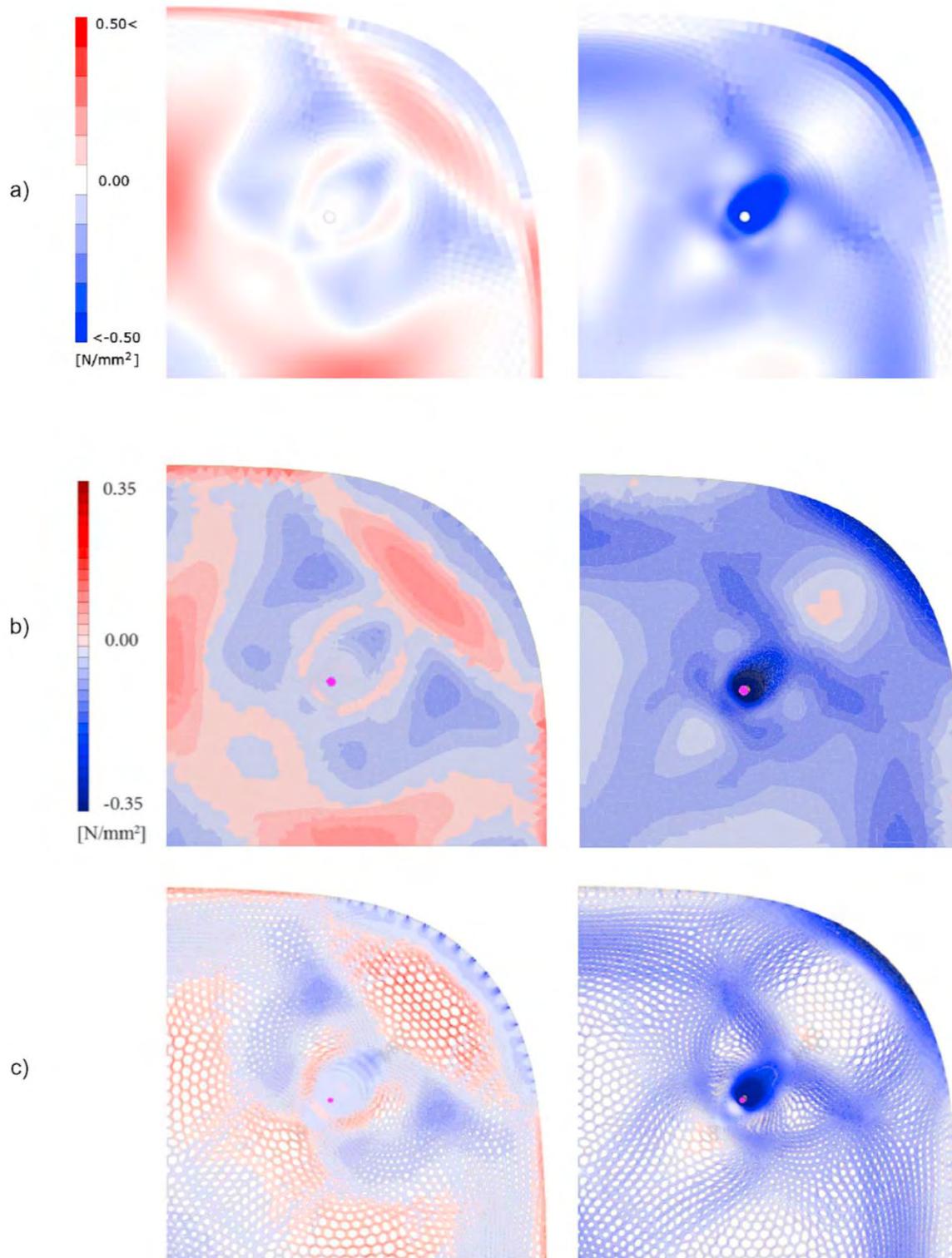


Рис. 77. Сравнение конструктивного анализа в программе Millipede (a) и SOFISTIK для непрерывной оболочки (b) и пористой оболочки (c). Показаны максимальные (слева) и минимальные (справа) главные напряжения

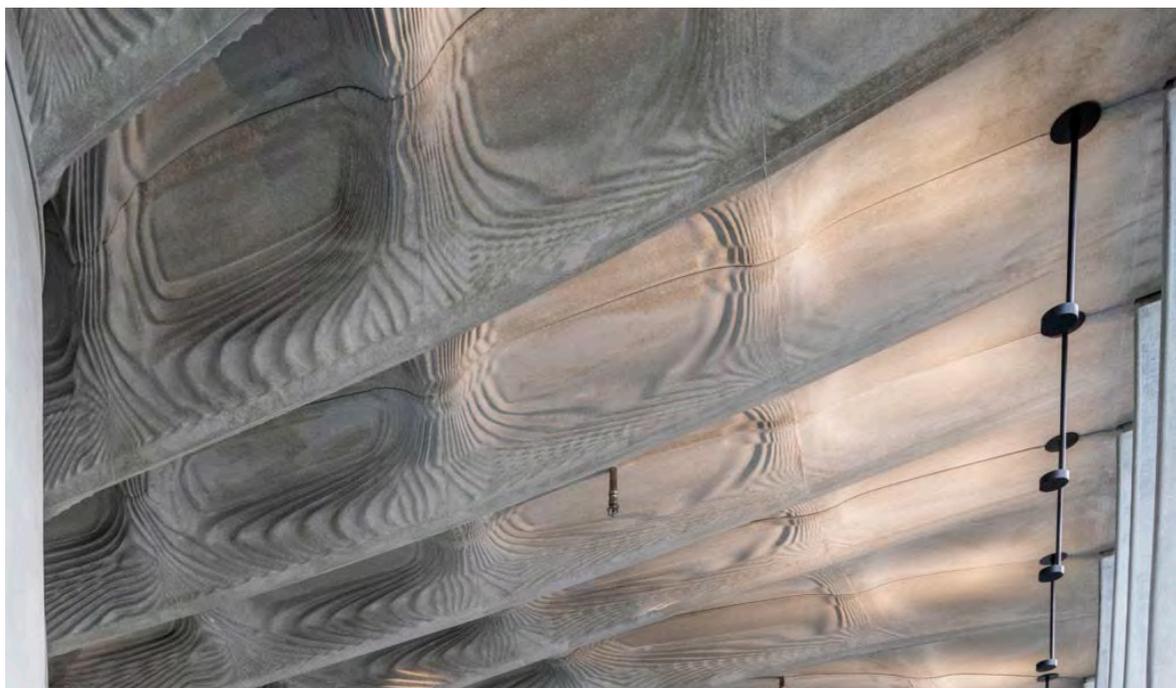


Рис. 78. Потолок здания DFAB House, Федеральный институт технологий в Цюрихе, 2017

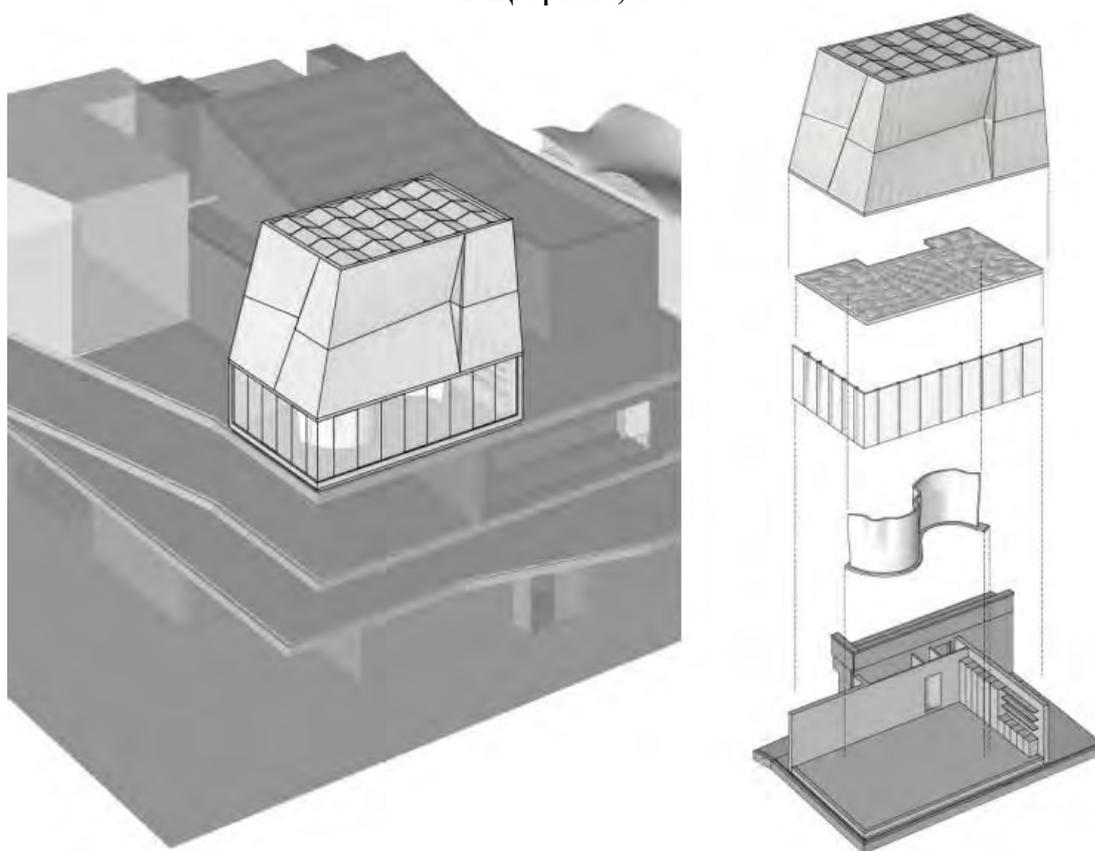


Рис. 79. Схема здания DFAB House, Федеральный институт технологий в Цюрихе, 2017

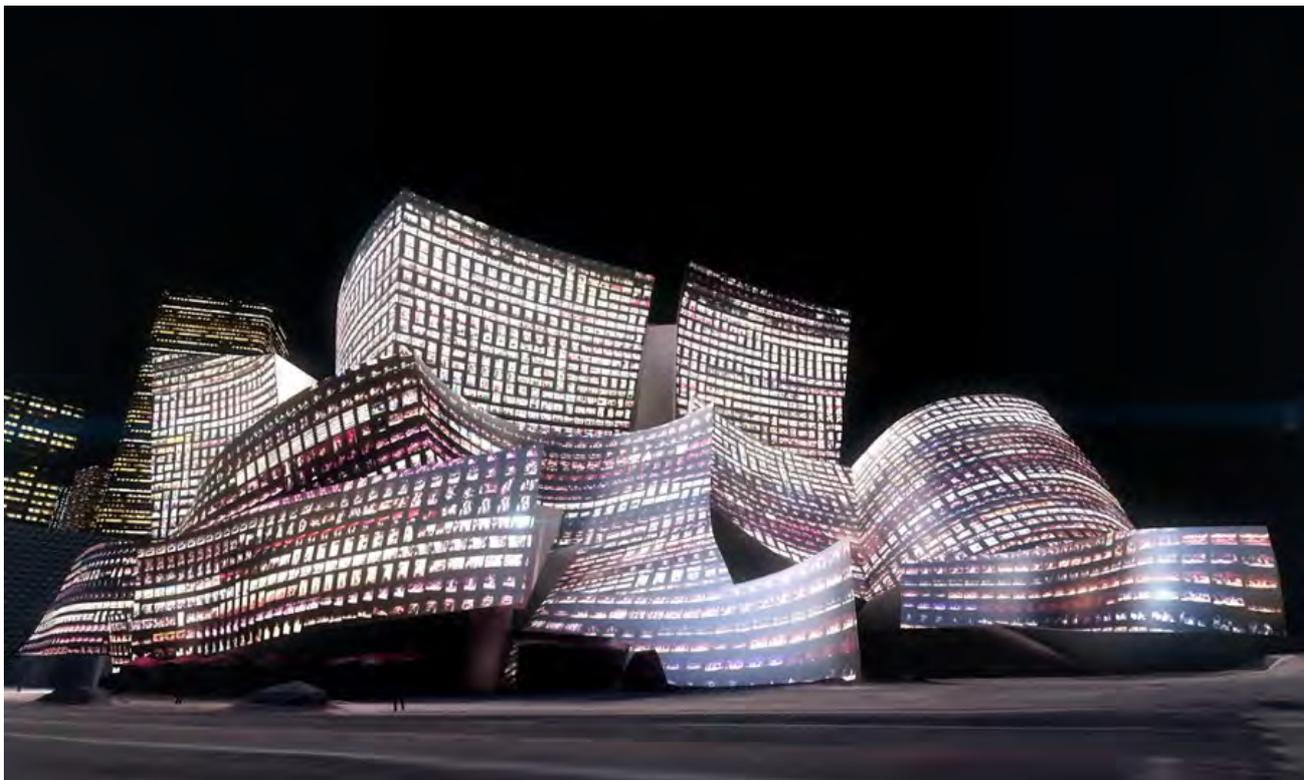


Рис. 80. Инсталляция на фасаде концертного зала Уолта Диснея,
Р. Анадол, 2018

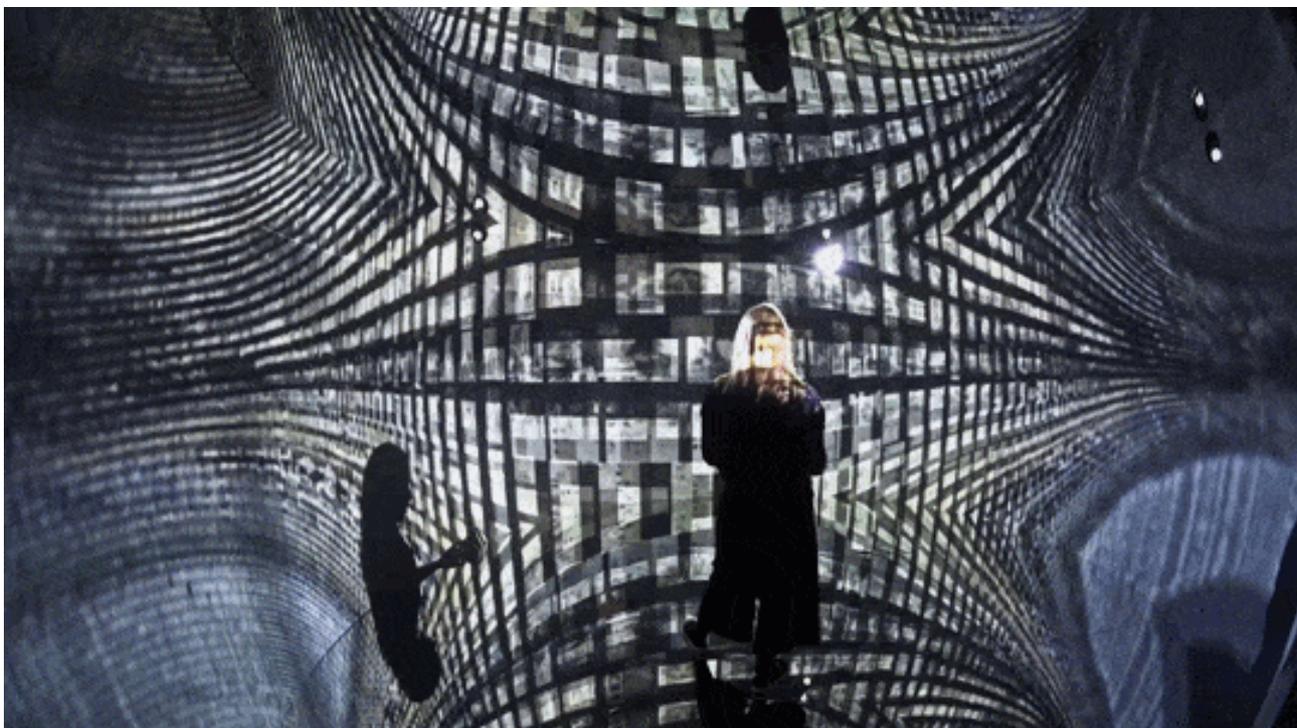


Рис. 81. Инсталляция на фасаде концертного зала Уолта Диснея,
Р. Анадол, 2018



Рис. 82. Своды музея Московского Кремля (раскладка плитки),
Nowadays Office, 2020

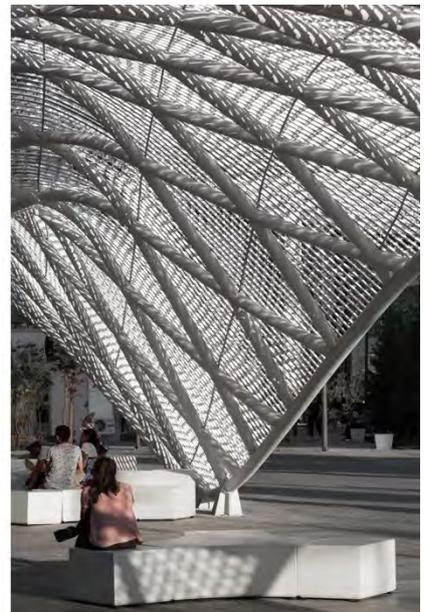


Рис. 83. Проекты павильонов EXPO 2017, Astana, архитектурное бюро Новое



Рис. 84. Дом Near the Forest, SA Lab, 2015

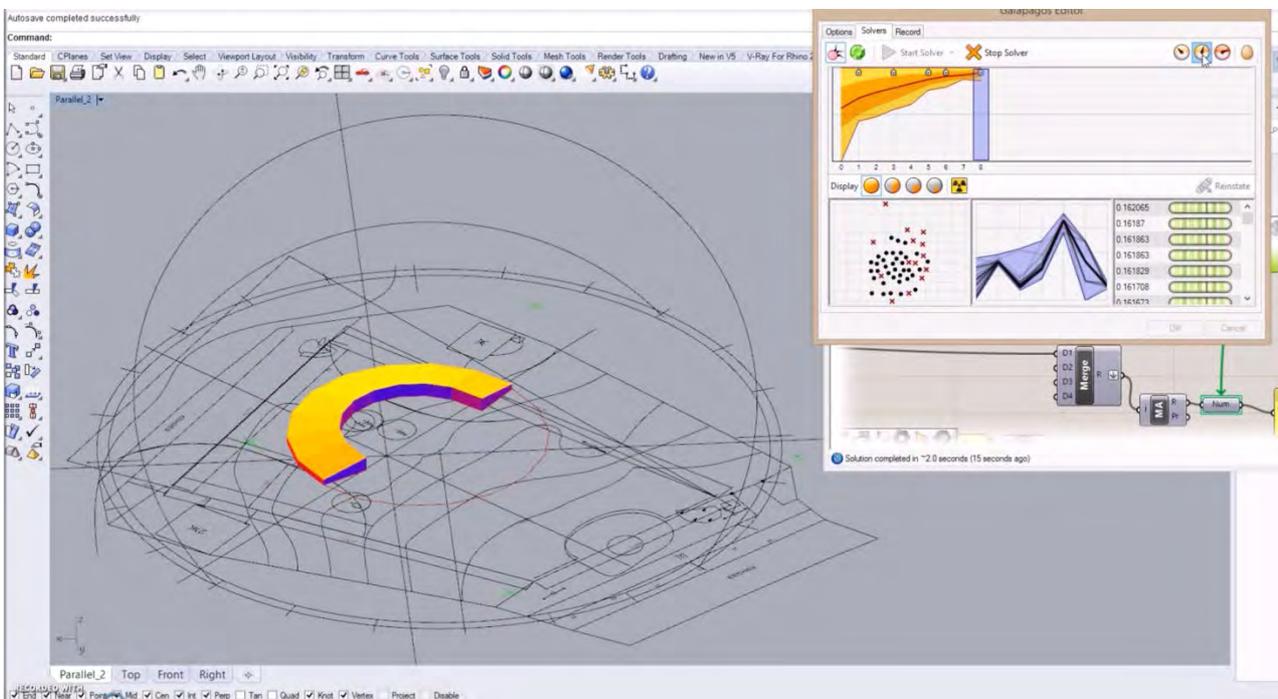


Рис.85. Генерация формы в Galapagos, Grasshopper, дом Near the Forest, SA Lab, 2015

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ФОРМИРОВАНИЯ АРХИТЕКТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ МЕТОДОВ И ТЕНДЕНЦИЯ ИХ РАЗВИТИЯ В XXI ВЕКЕ



Рис. 86. Правила самоорганизации движений птиц (скворцов)



Рис. 87. Движение стаи скворцов



Рис. 88. Центр Гейдара Алиева в Баку, Zaha Hadid Architects, 2013

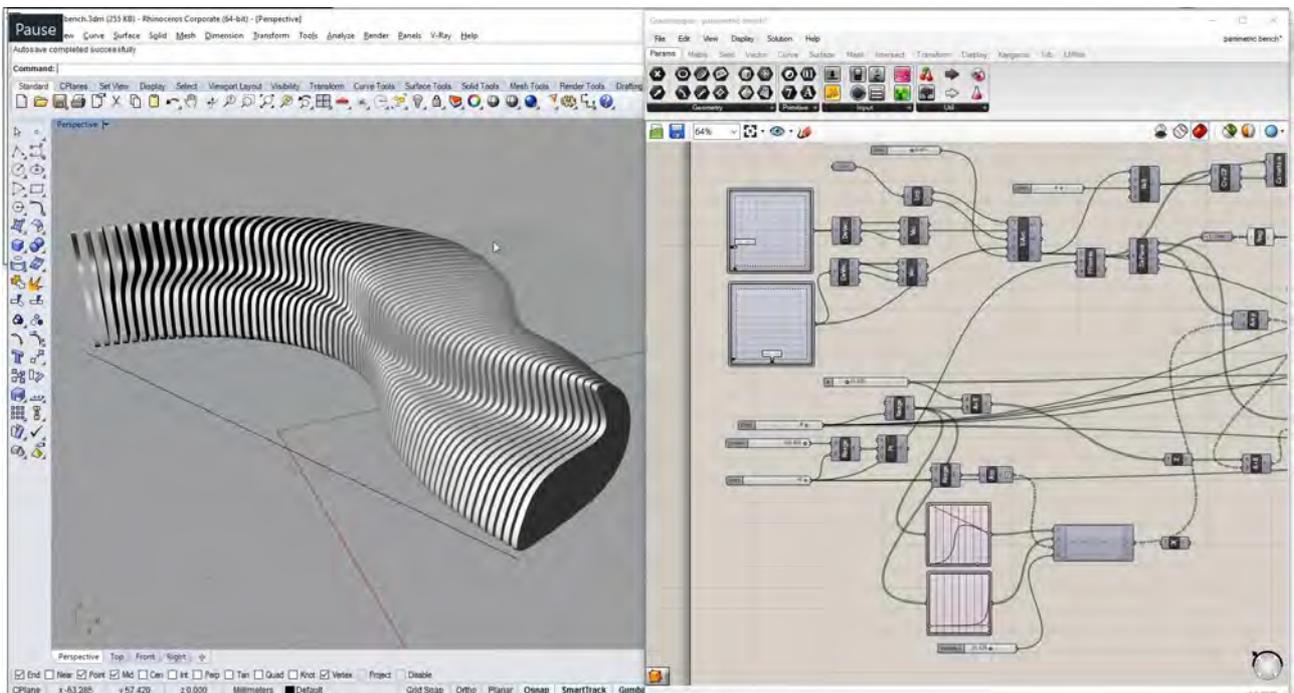


Рис. 89. Интерфейс программы Rhinoceros и инструмента визуального программирования Grasshopper

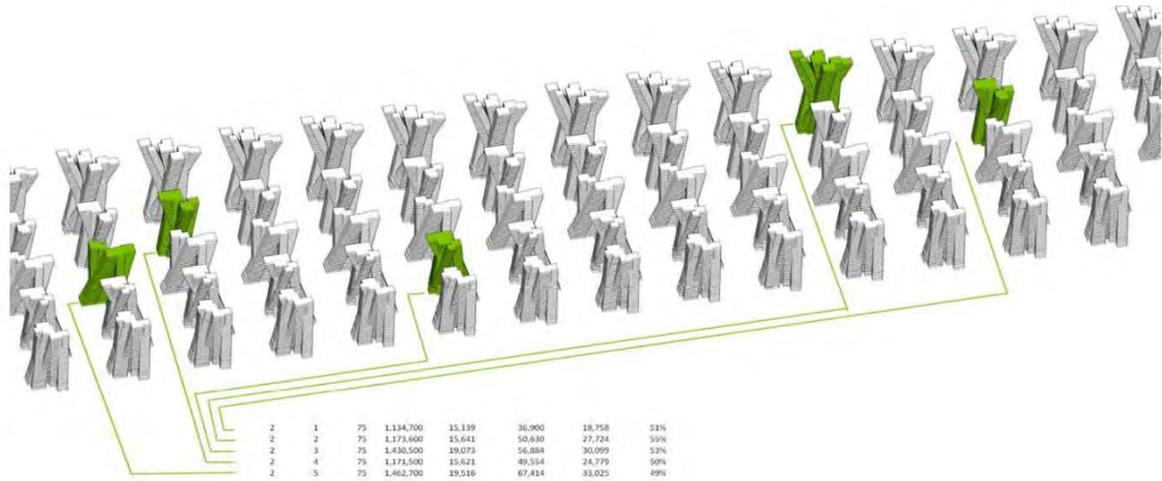


Рис. 90. Создание вариантов небоскреба путем применения генеративных алгоритмов, Нейт Холланд, Университет Небраски – Линкольн, 2011

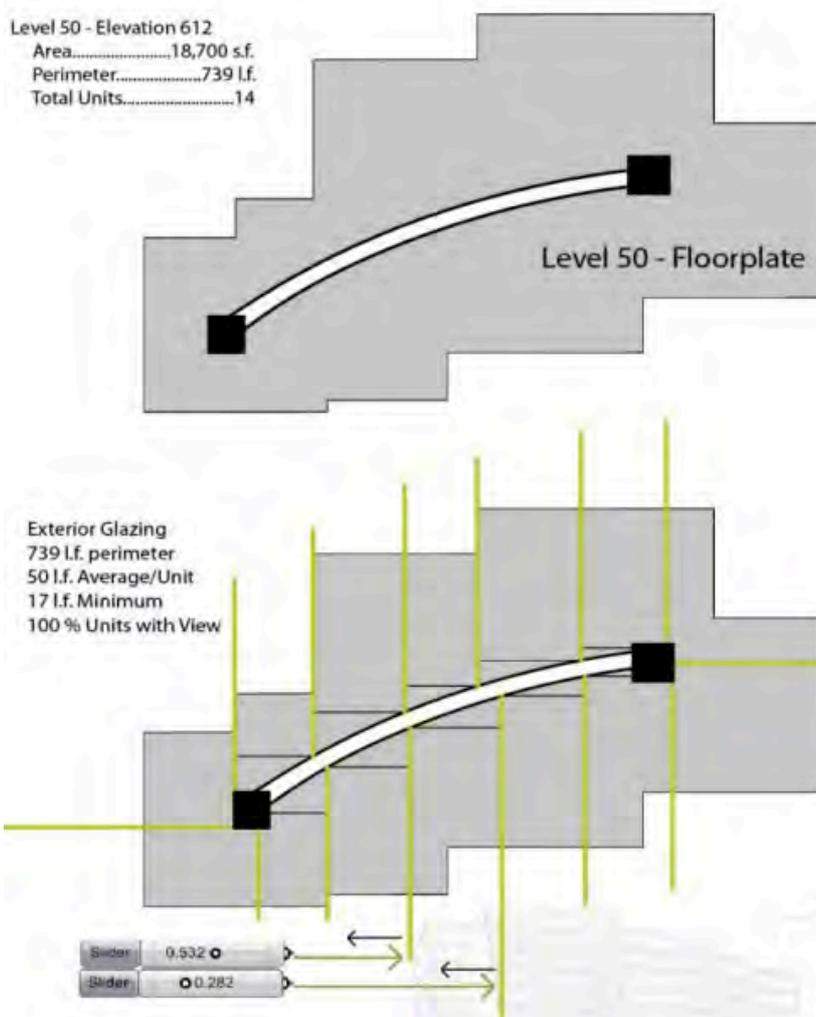


Рис. 91. Создание вариантов планировок небоскреба путем применения генеративных алгоритмов, Нейт Холланд, Университет Небраски – Линкольн, 2011

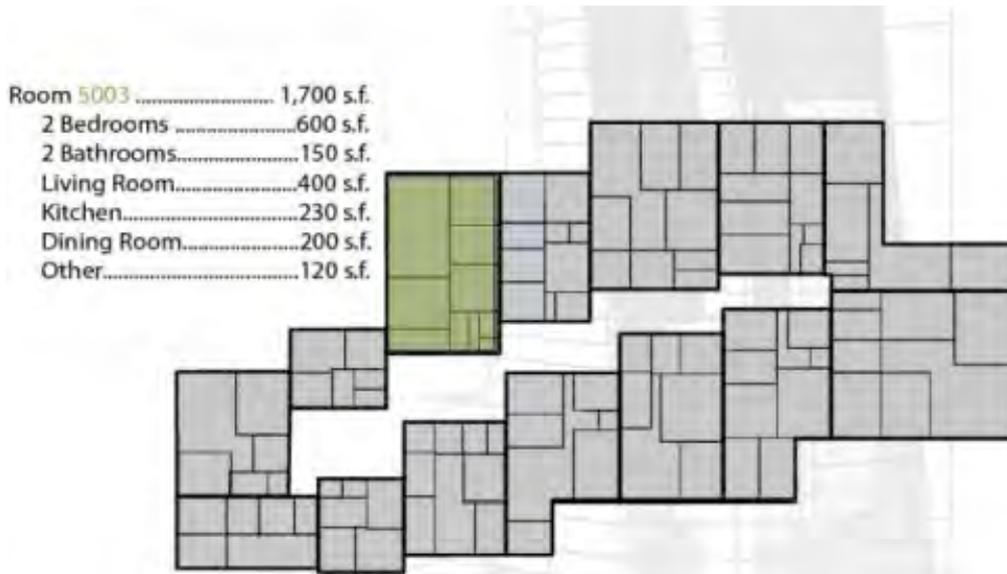


Рис. 92. Создание вариантов планировок небоскреба путем применения генеративных алгоритмов, Нейт Холланд, Университет Небраски – Линкольн, 2011

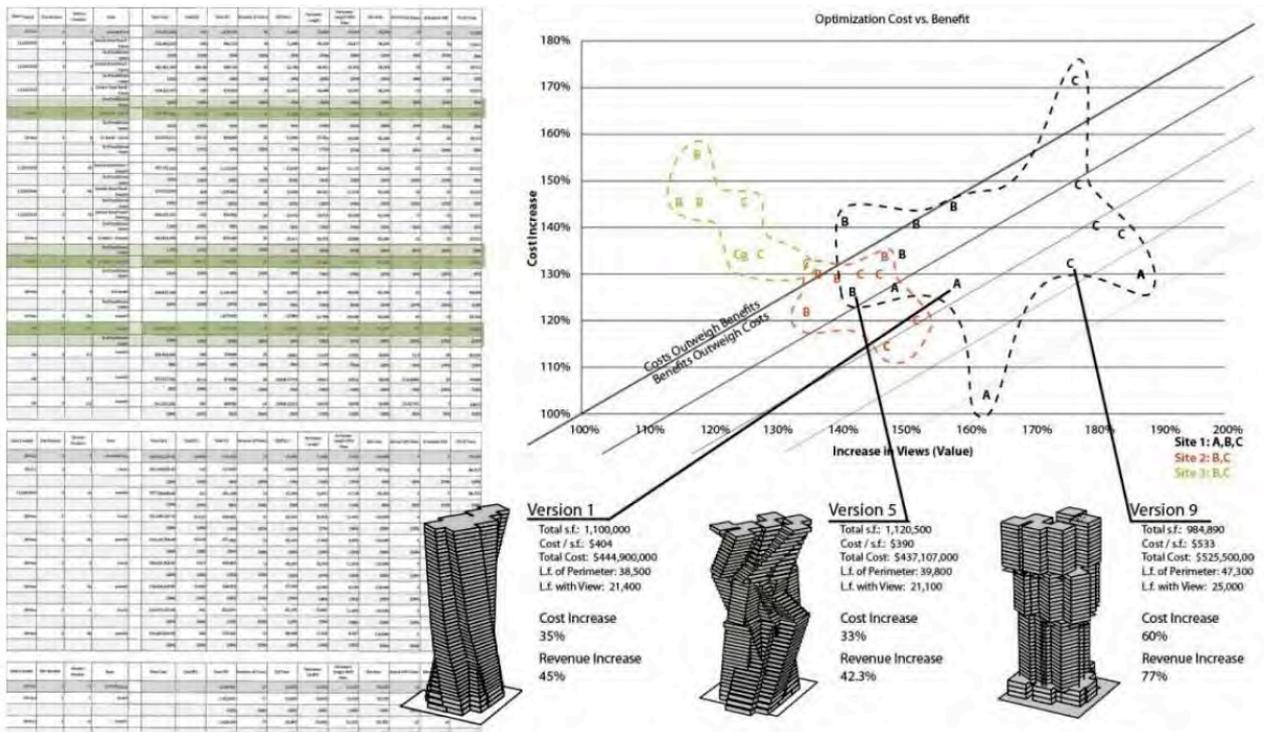


Рис. 93. Создание вариантов форм небоскреба путем применения генеративных алгоритмов, Нейт Холланд, Университет Небраски – Линкольн, 2011

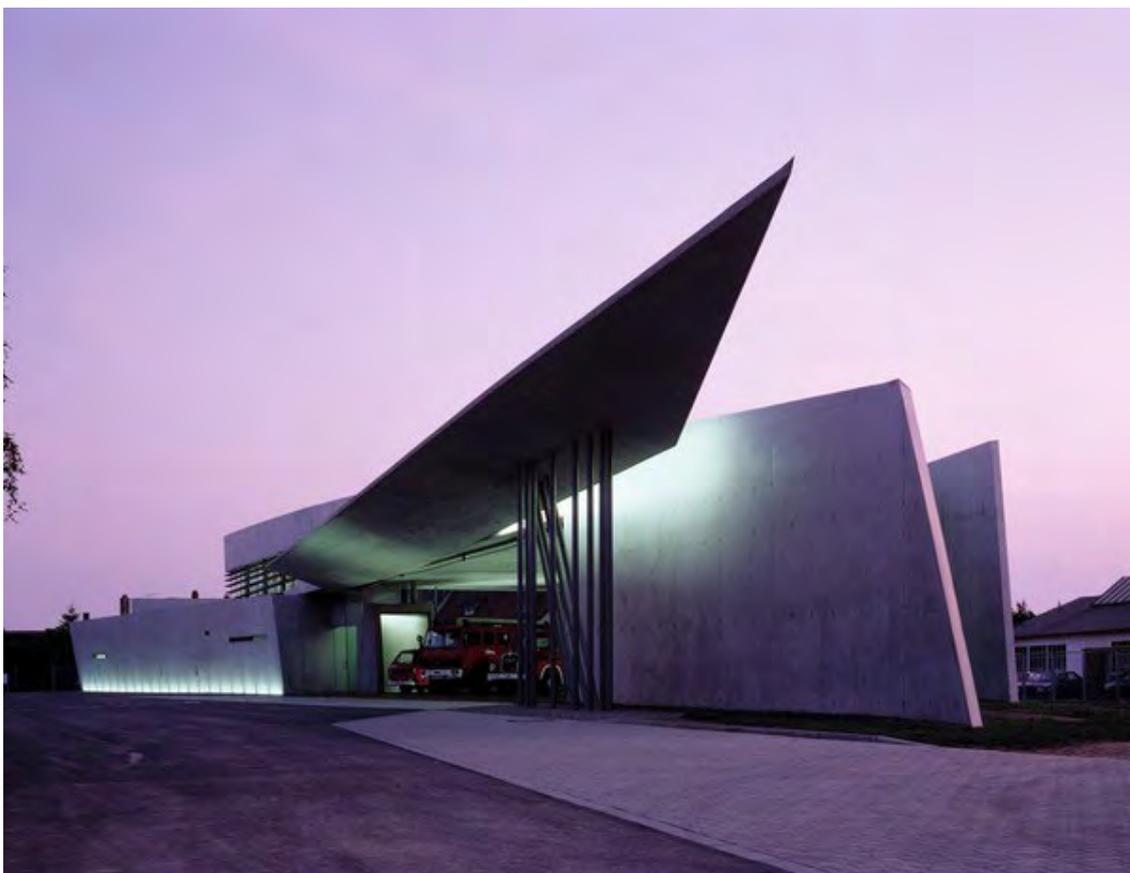


Рис. 94. Пожарная часть Vitra, 1991–1993, Zaha Hadid Architects

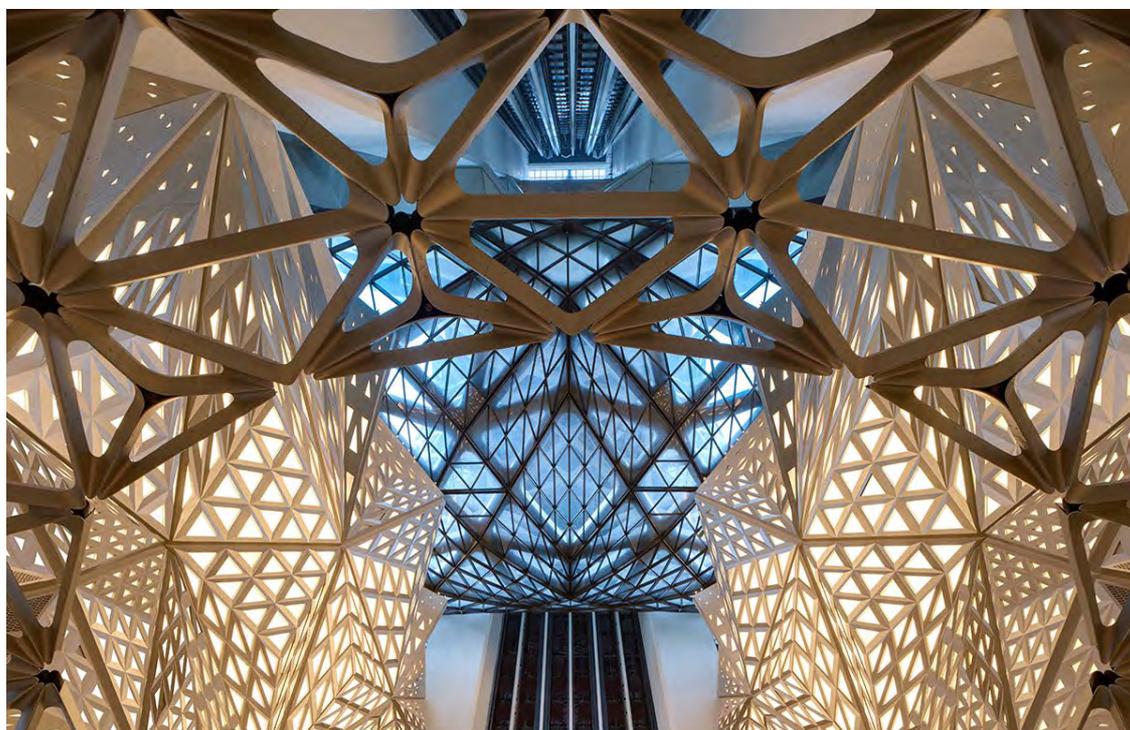


Рис. 95. Отель Морфейс (интерьер), Zaha Hadid Architects, Китай, 2018

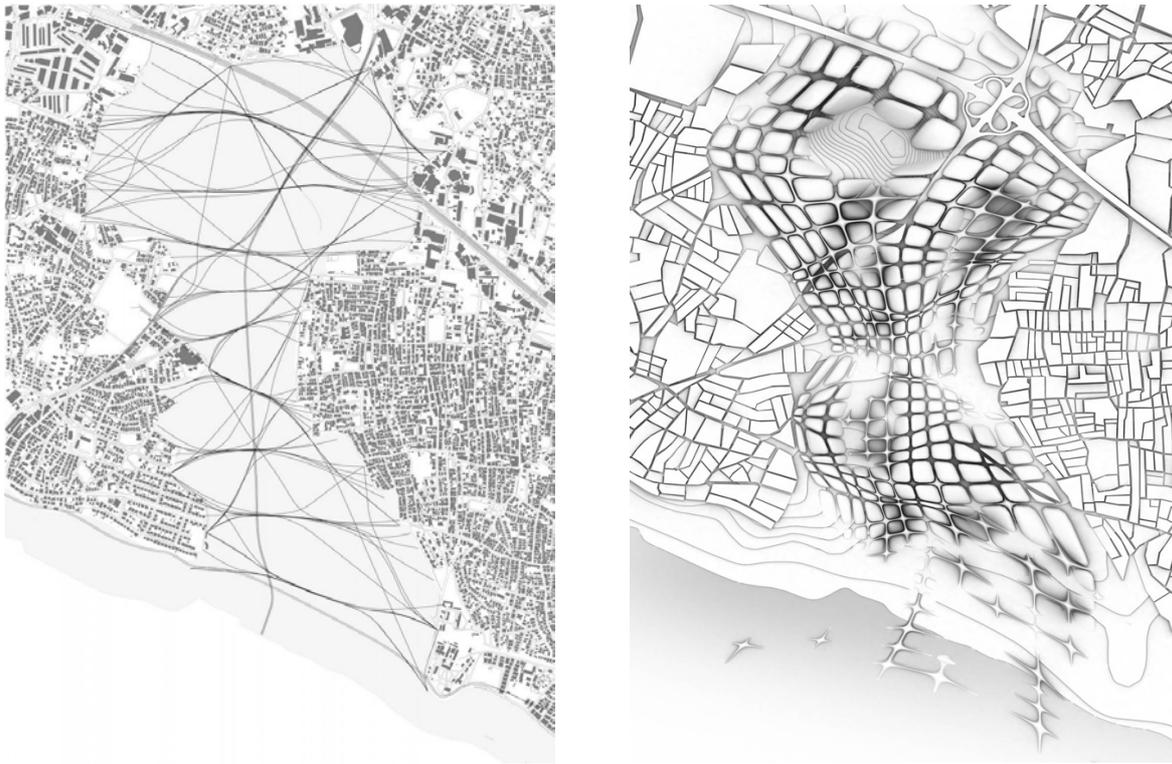


Рис. 96. Zaha Hadid Architects, Мастер-план района Картал-Пендик в Стамбуле, Турция, 2006

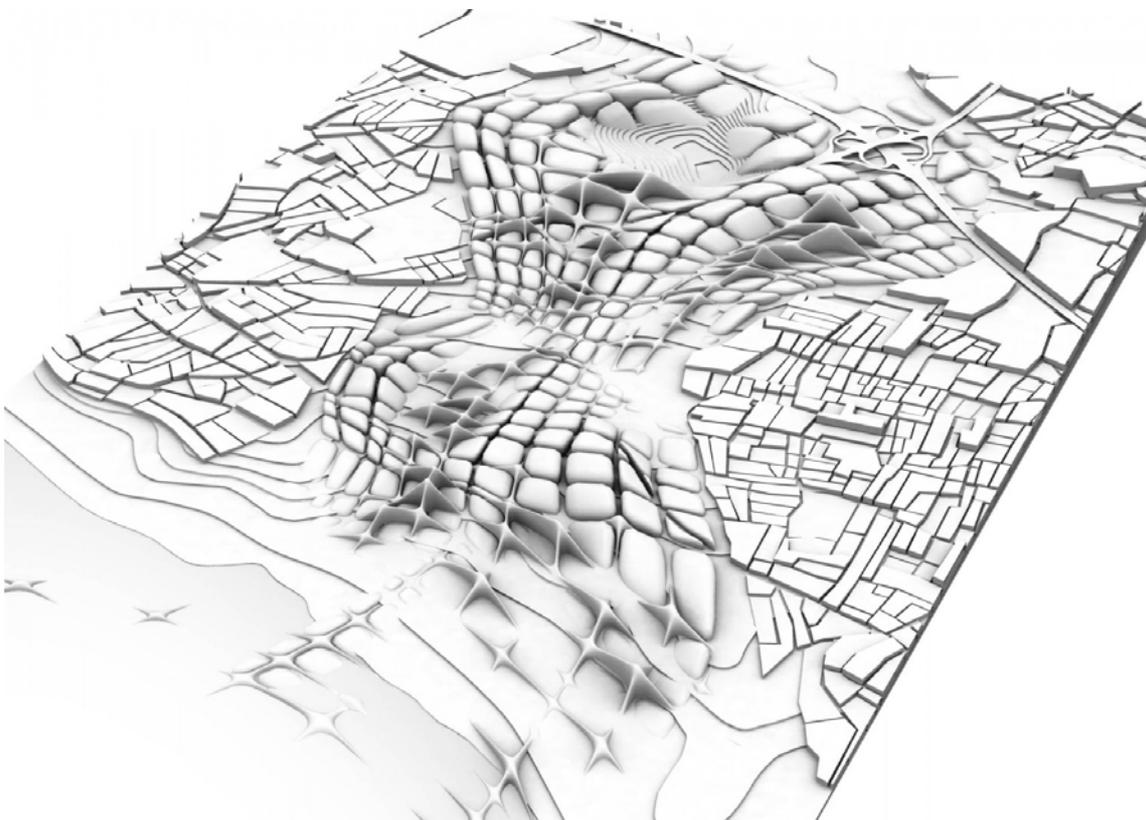


Рис. 97. Zaha Hadid Architects, Мастер-план района Картал-Пендик в Стамбуле, Турция, 2006

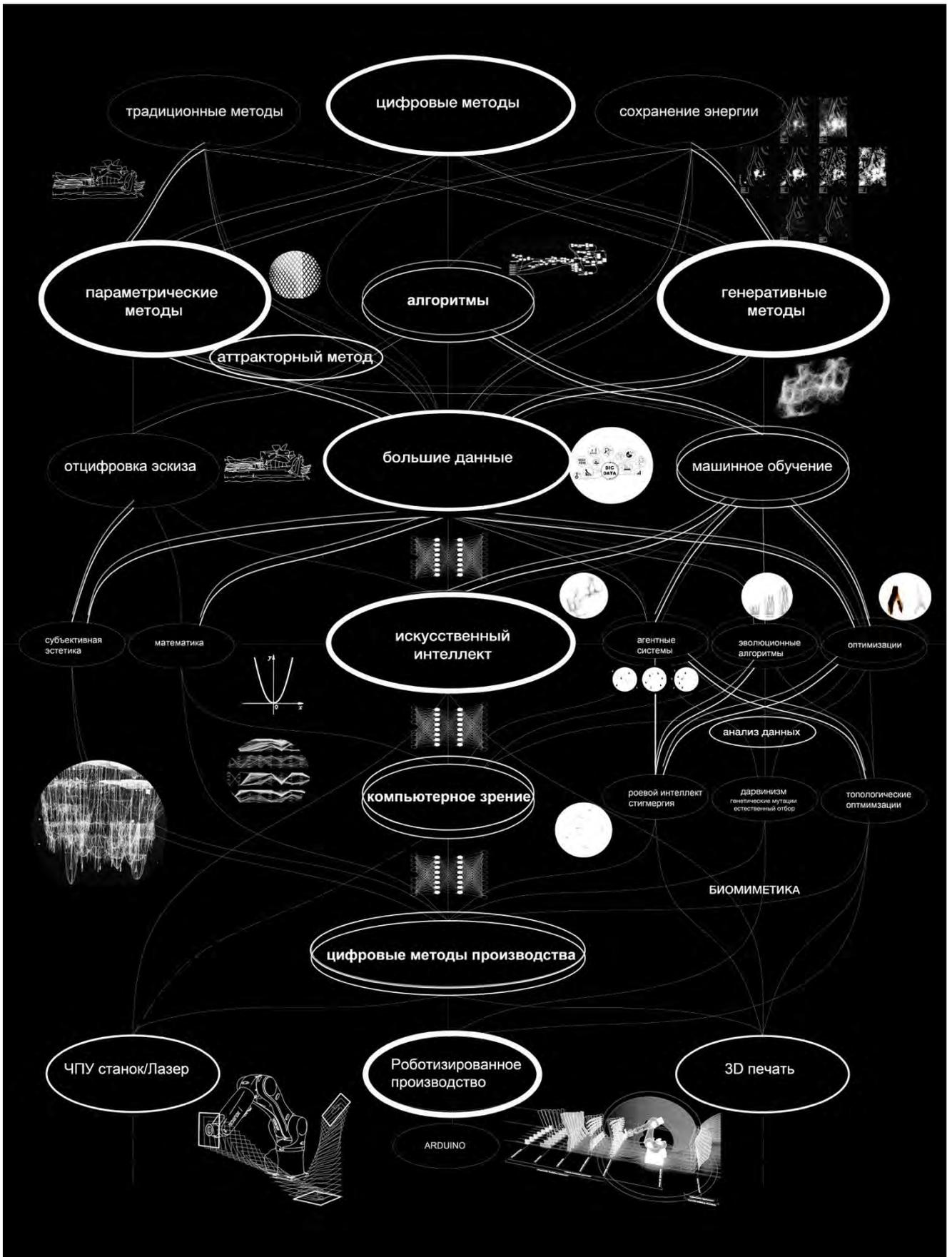


Рис. 98. Основные направления цифровых методов

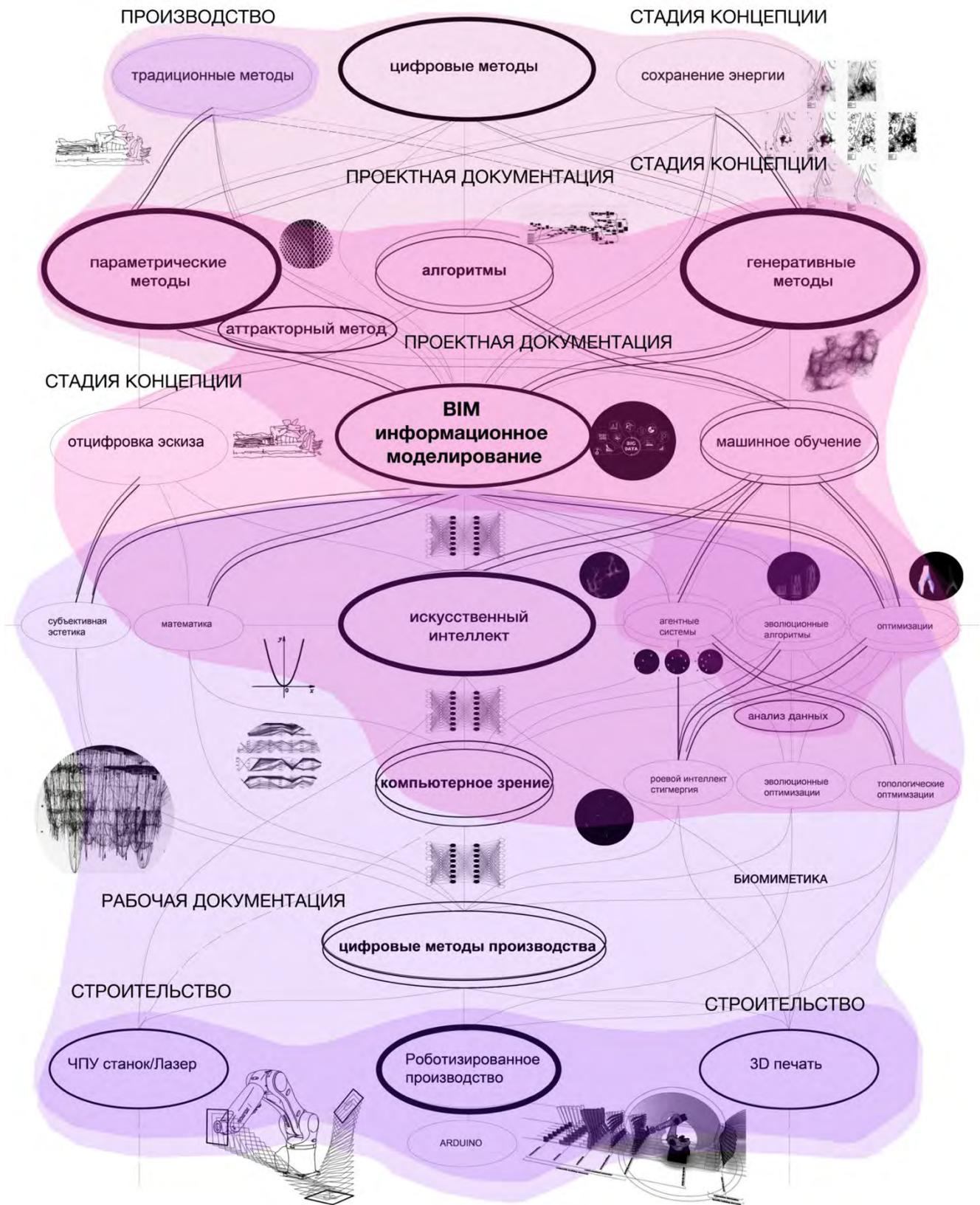


Рис. 99. Внедрение цифровых методов на различных этапах архитектурного проектирования

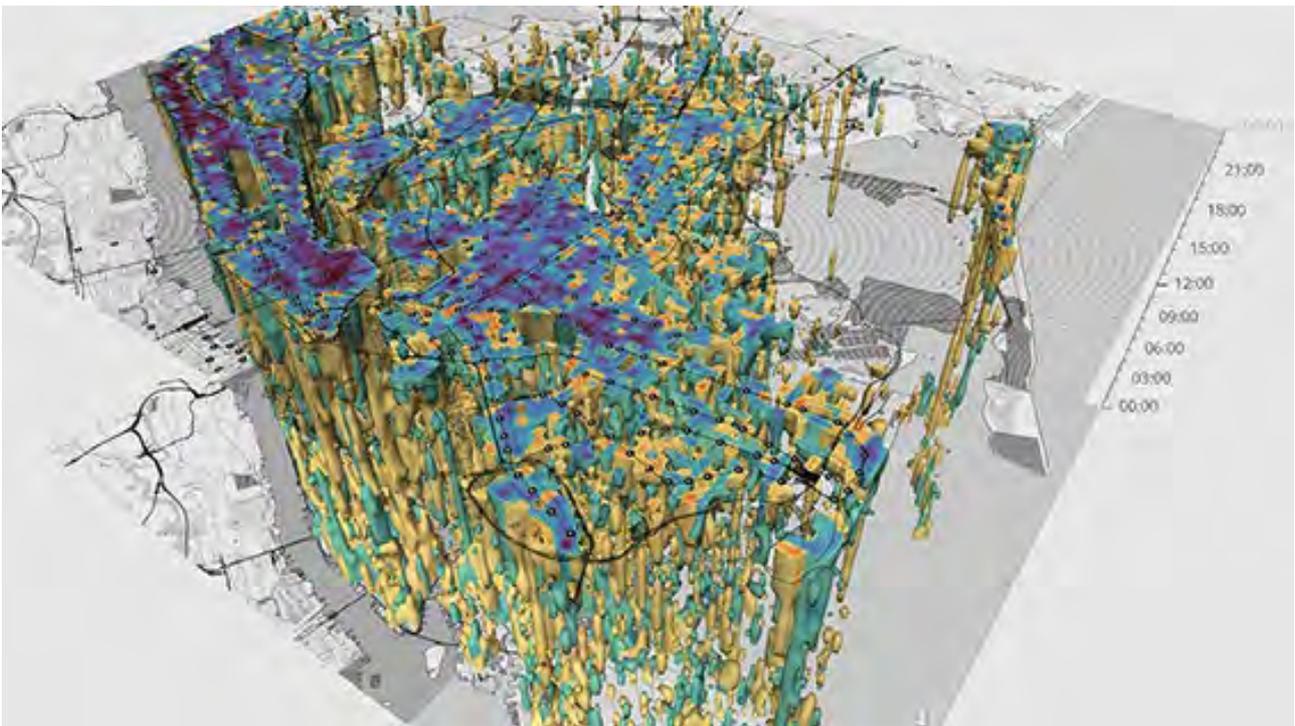


Рис. 100. Хронотоп – платформа компании Habidatum, данные, зафиксированные за определенное время и в определенном месте

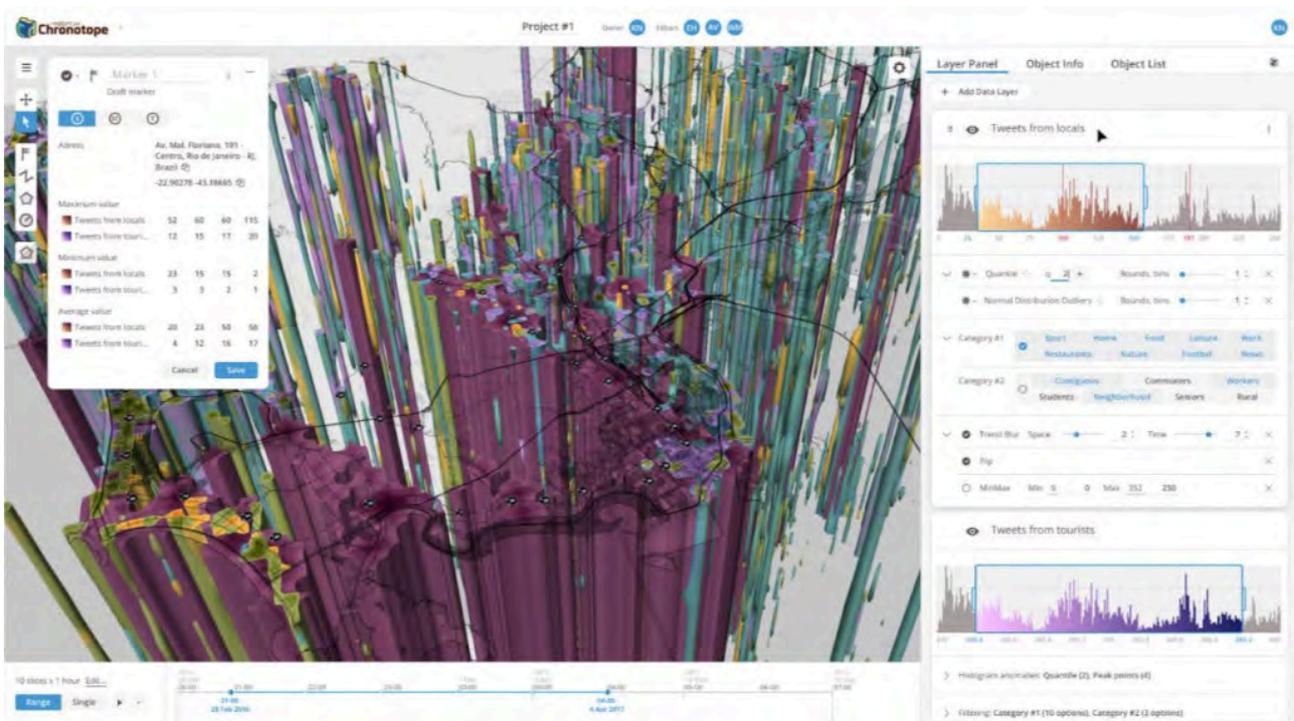


Рис. 101. Интерфейс программы Хронотоп, данные за определенное время и в определенном месте

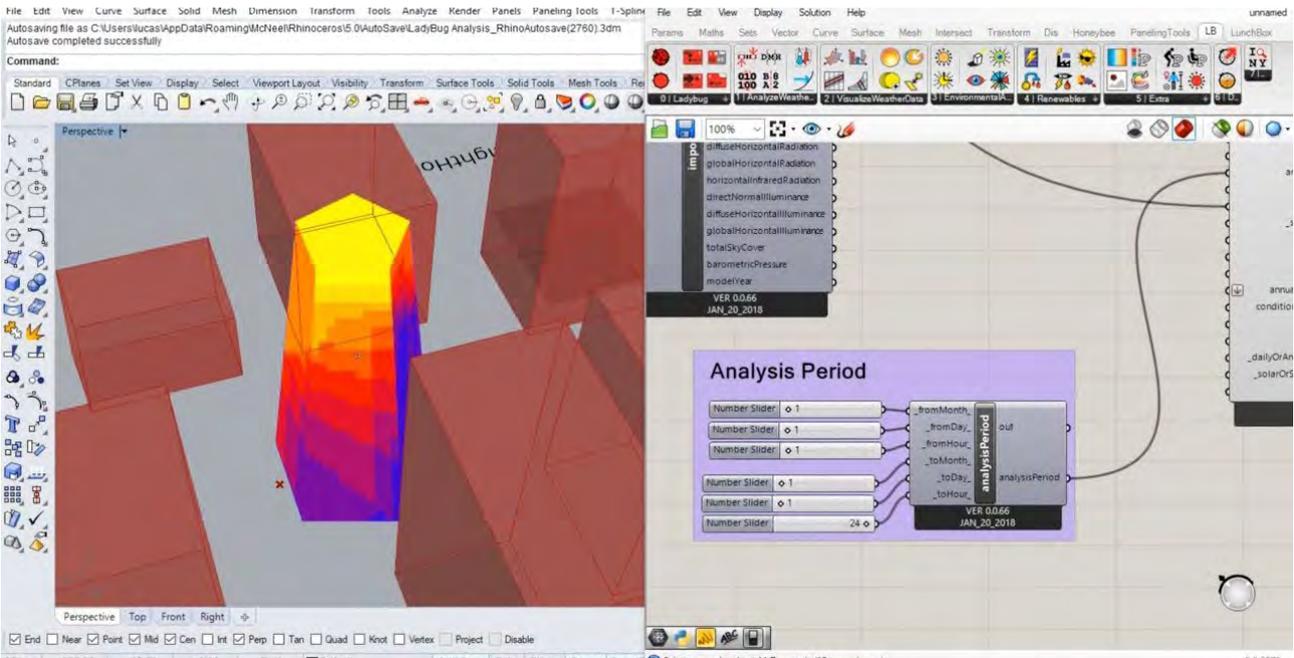


Рис. 102. Генерация архитектурной формы на основе климатических и геологических особенностей участка проектирования, интерфейс программы Grasshopper

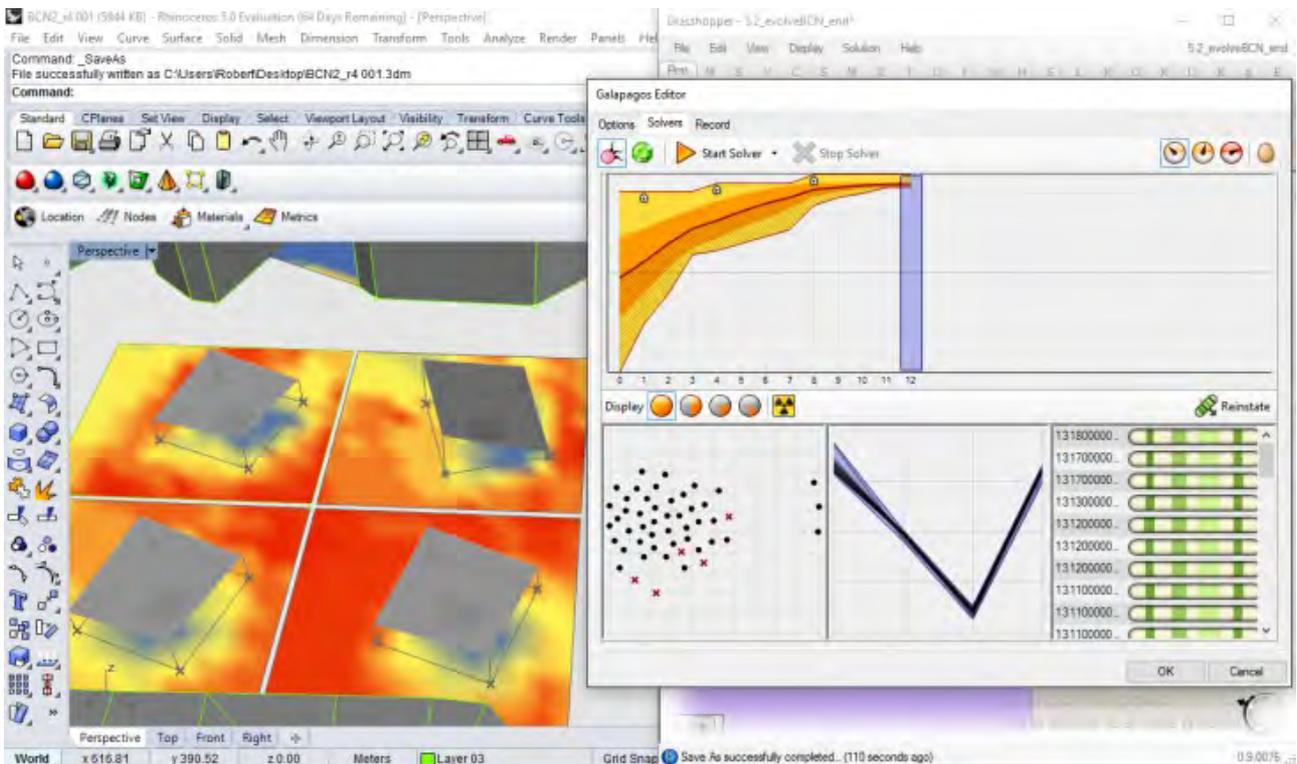


Рис. 103. Генерация архитектурной формы на основе заданных правил и эволюционных алгоритмов, интерфейс программы Grasshopper

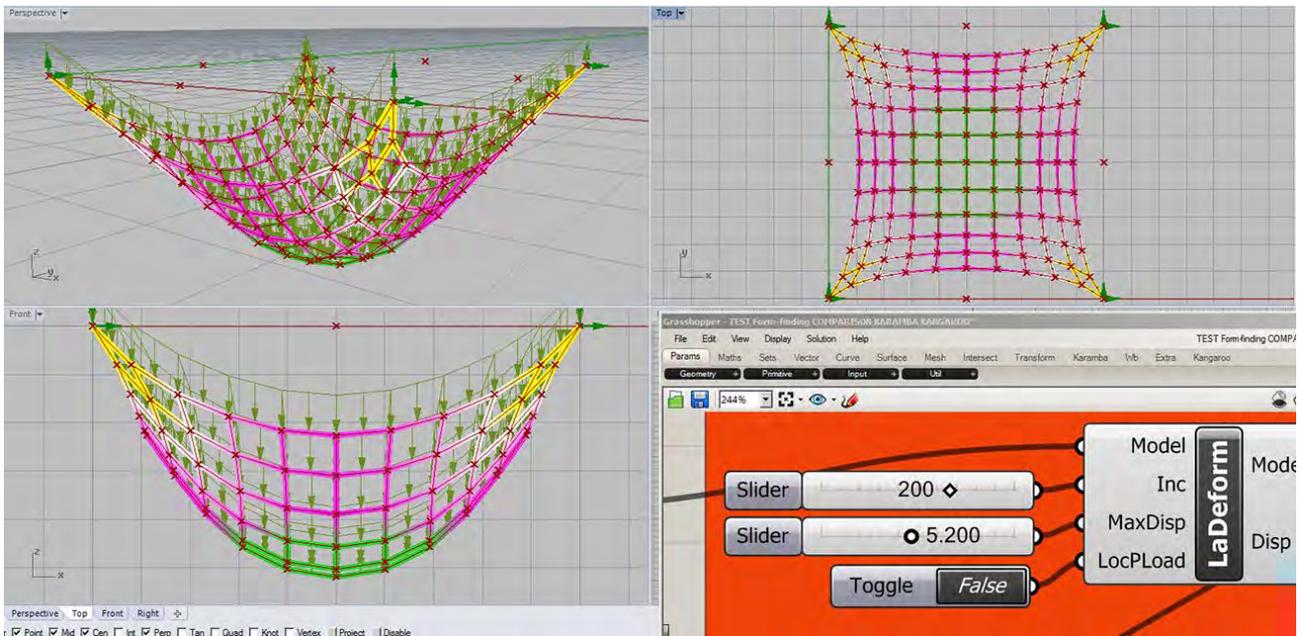


Рис. 104. Формирование архитектурного объема путем внедрения физических симуляций, интерфейс программы Grasshopper, плагин Kangaroo

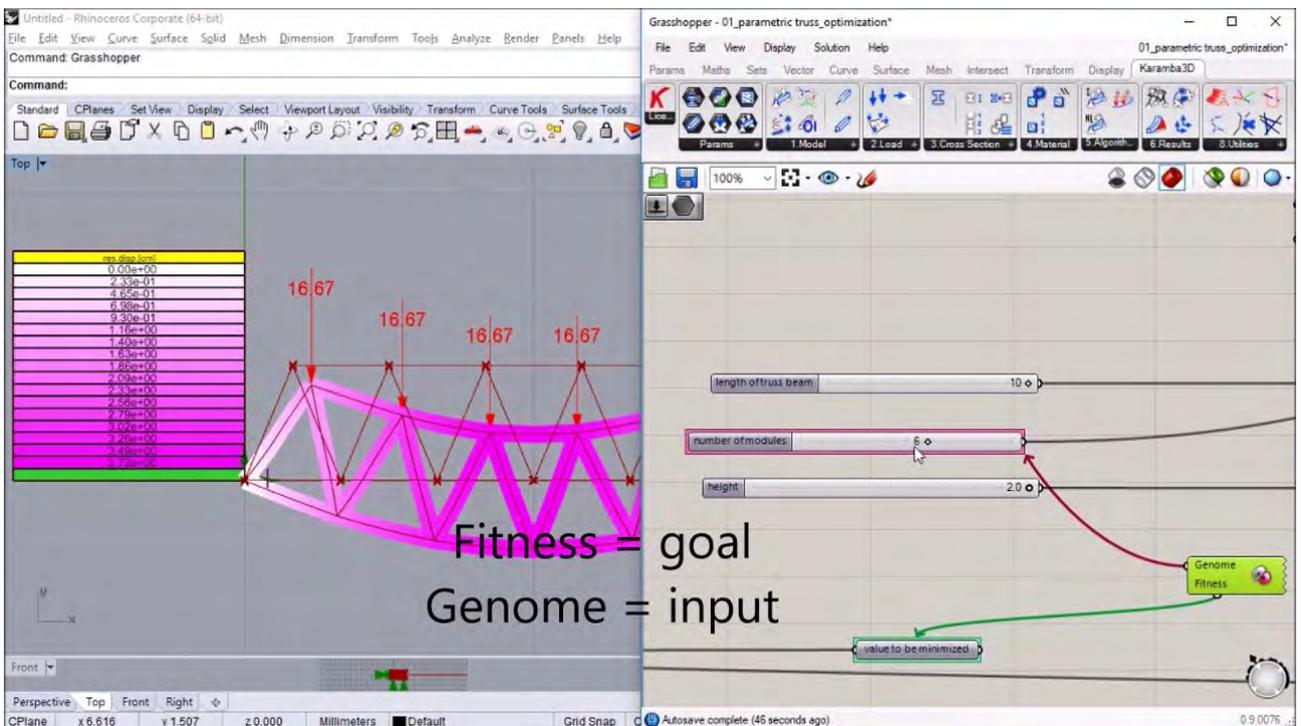


Рис. 105. Первичная конструктивная оптимизация разработанной архитектурной формы, плагин Karamba и Galapagos

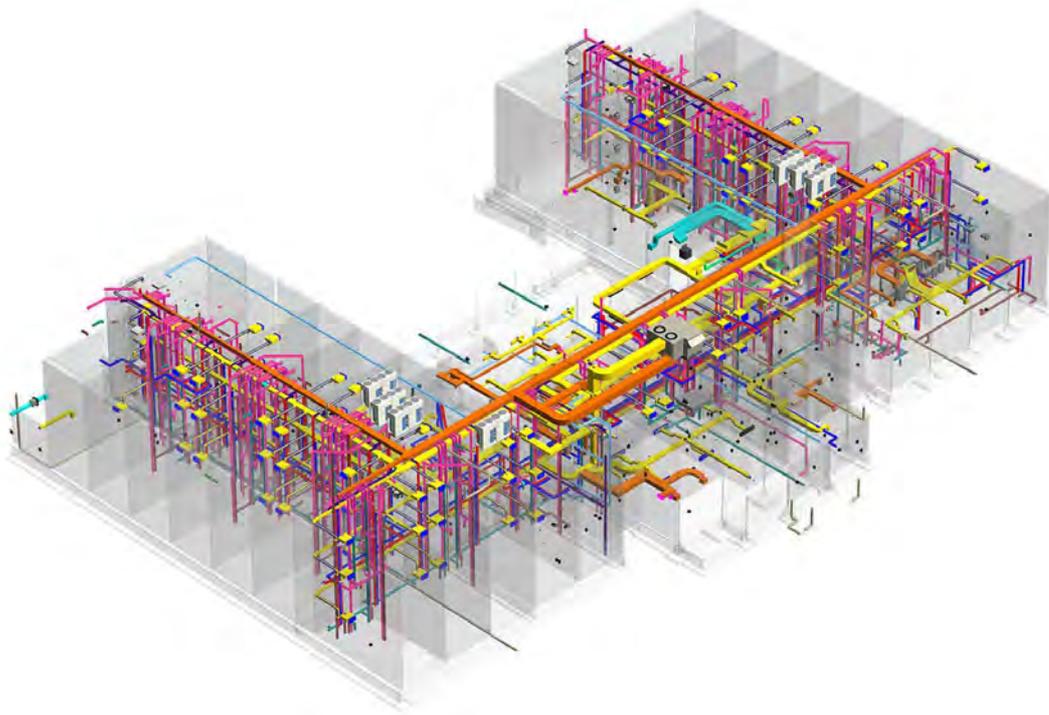


Рис. 106. BIM-модель здания



Рис. 107. Алгоритмическое моделирование элементов здания (деталей фасада), Отель Морфейс, Zaha Hadid Architects, Китай, 2018

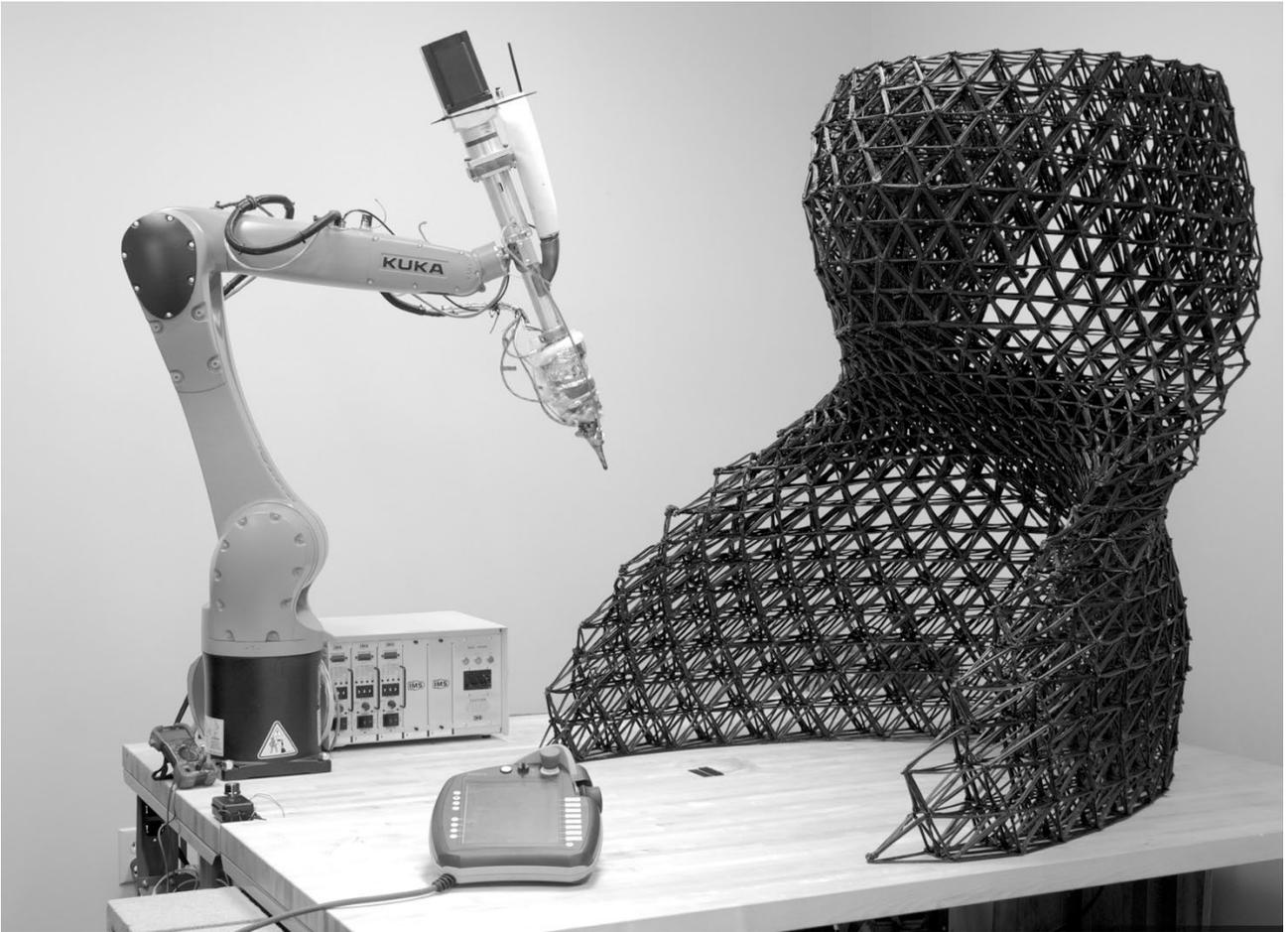


Рис. 108. Инструменты цифрового производства, роботизированная рука, 2015

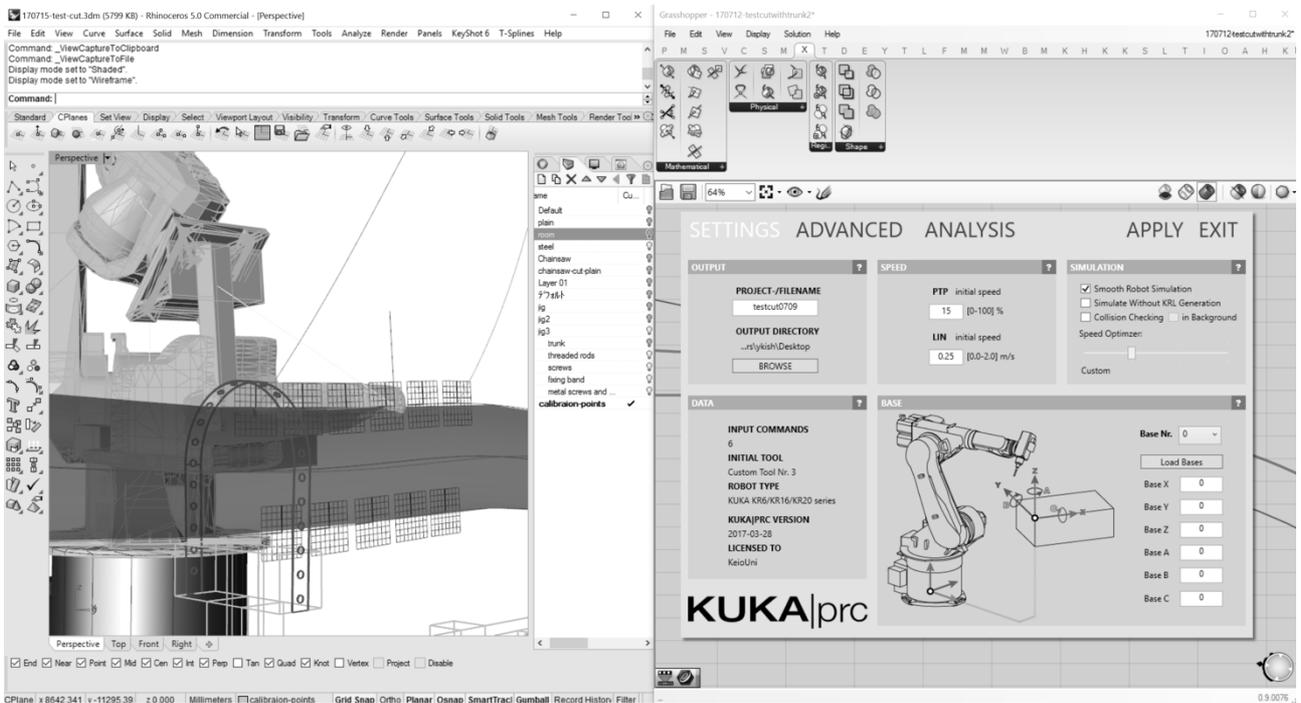


Рис. 109. Подготовка цифровой модели в программе Rhinoceros к процессу производства



Рис. 110. Цифровое производство, роботизированная рука, создание инсталляций



Рис. 111. Слева направо: эксперименты по поиску формы с тканью, стекловолокном и листами АРЕТ.

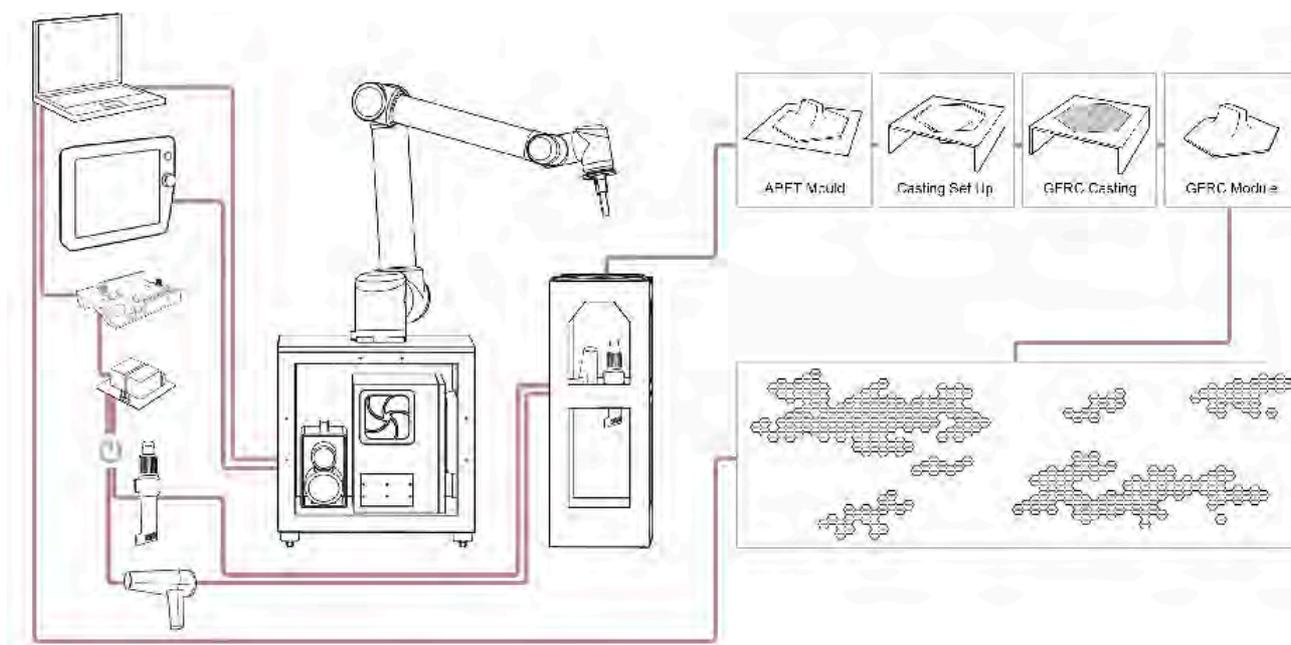


Рис. 112. Обзорная схема процесса, включая термоформование, литье и монтаж



Рис. 113. Обзор формовки и литья с использованием армированного стекловолокном белого цемента

ГЛАВА 3. МЕТОДЫ ГЕНЕРАТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОЕКТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ

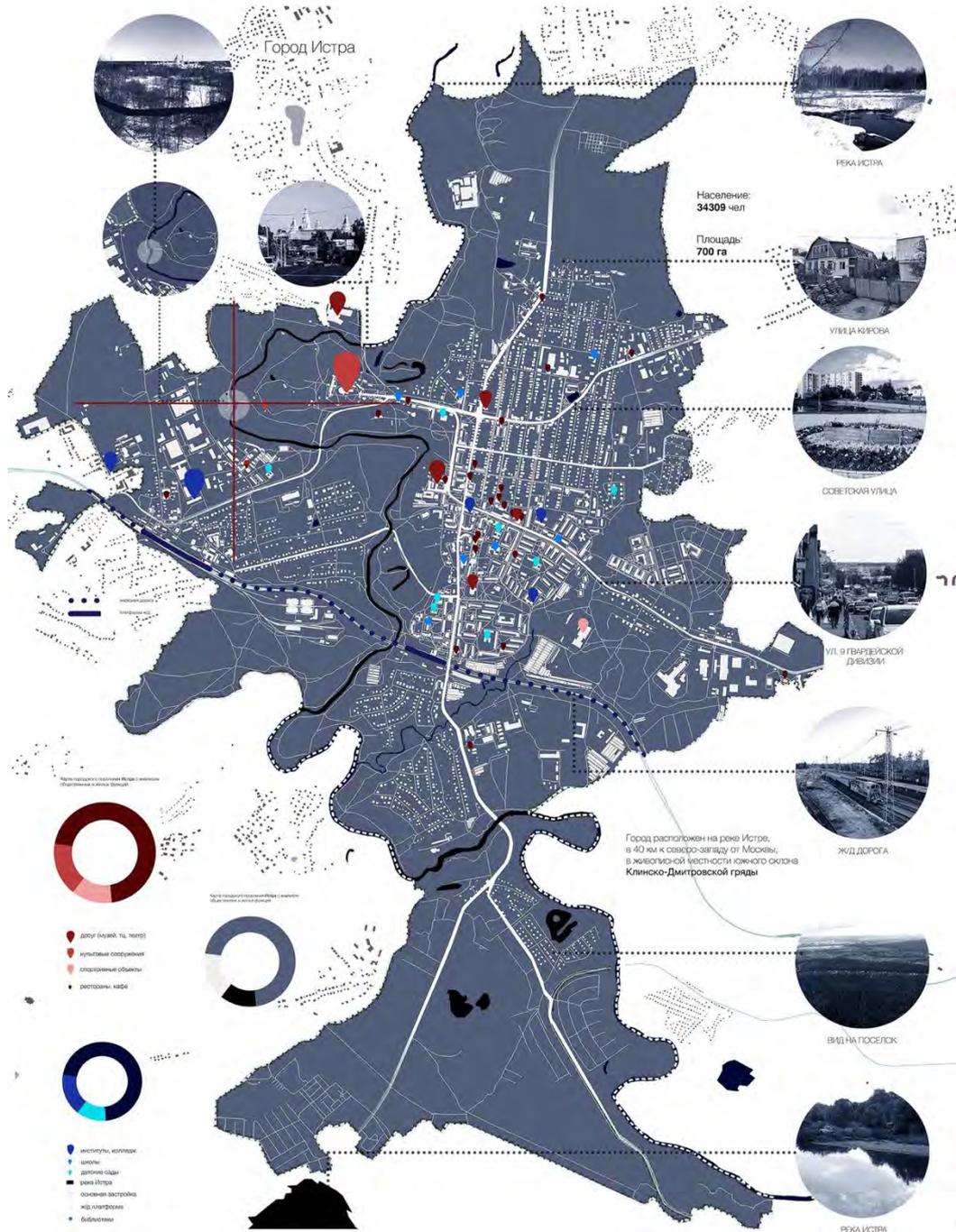


Рис. 114. Карта города Истра, Московская область

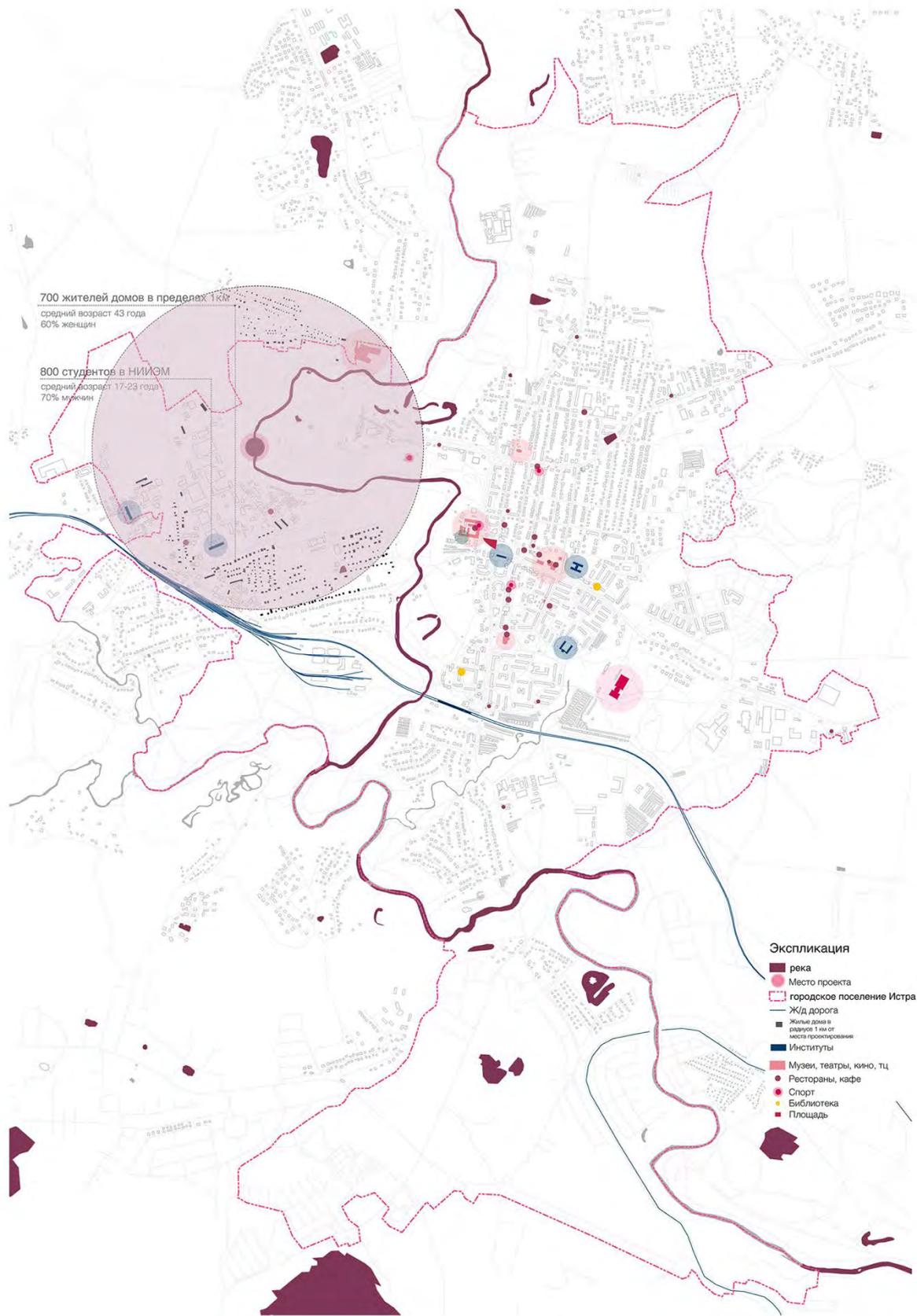


Рис. 115. Карта города Истра, Московская область, с анализом окружающей застройки проектируемого участка и распределением социальных групп в пределах 1 км от участка

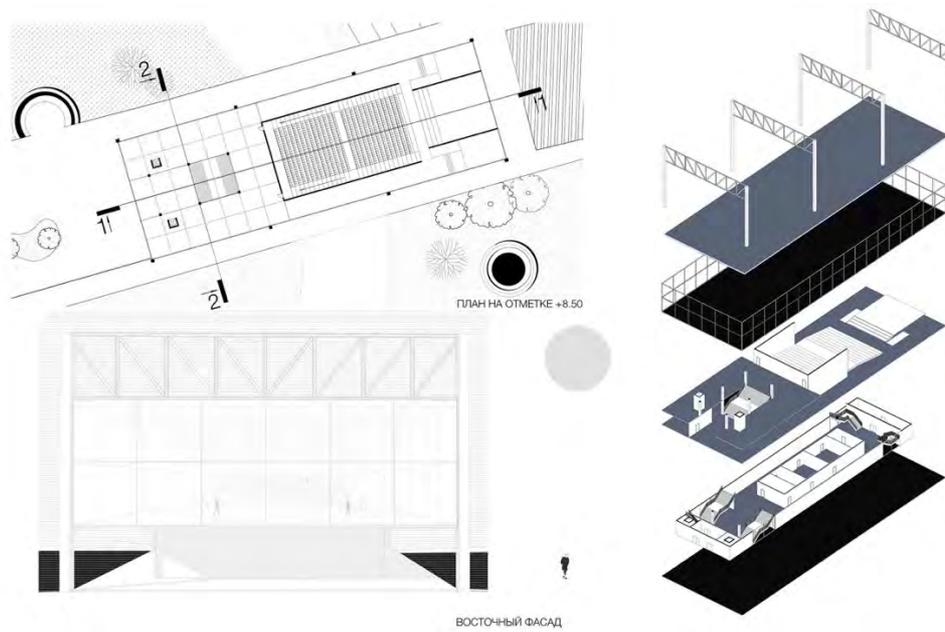


Рис. 116. Первая итерация формы общественного центра в городе Истре

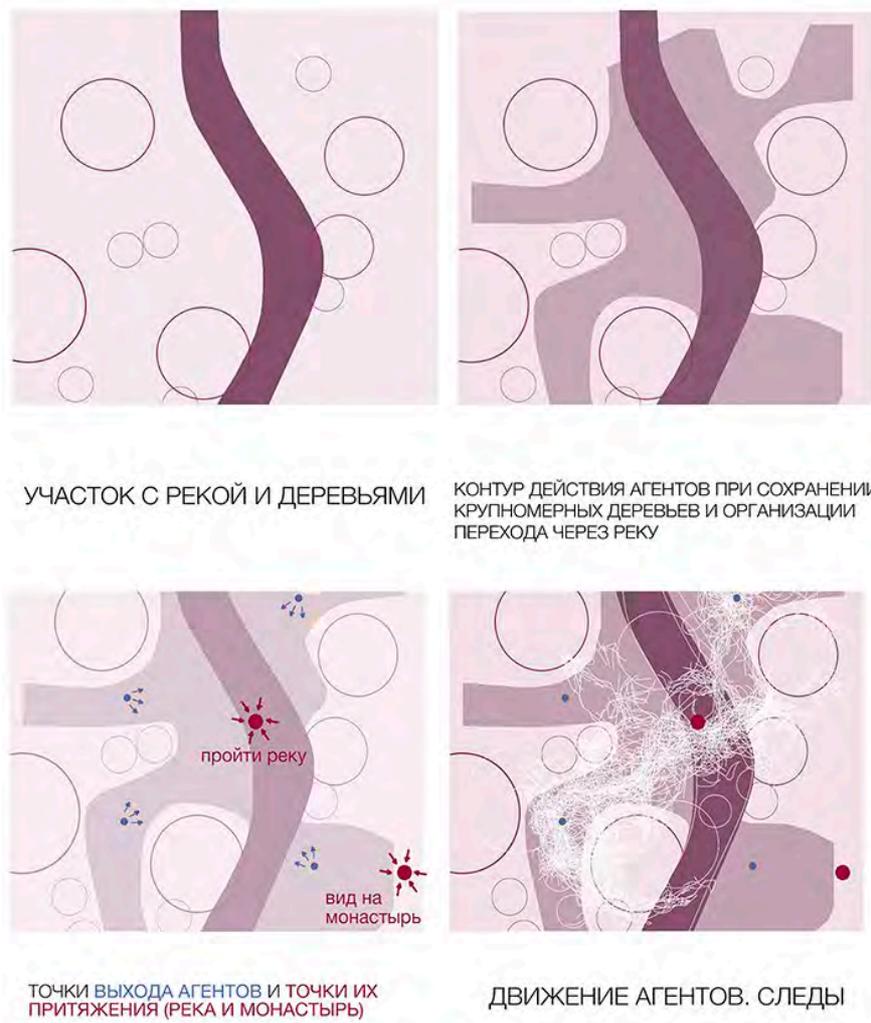


Рис. 117. Основные правила работы алгоритмов в процессе формообразования

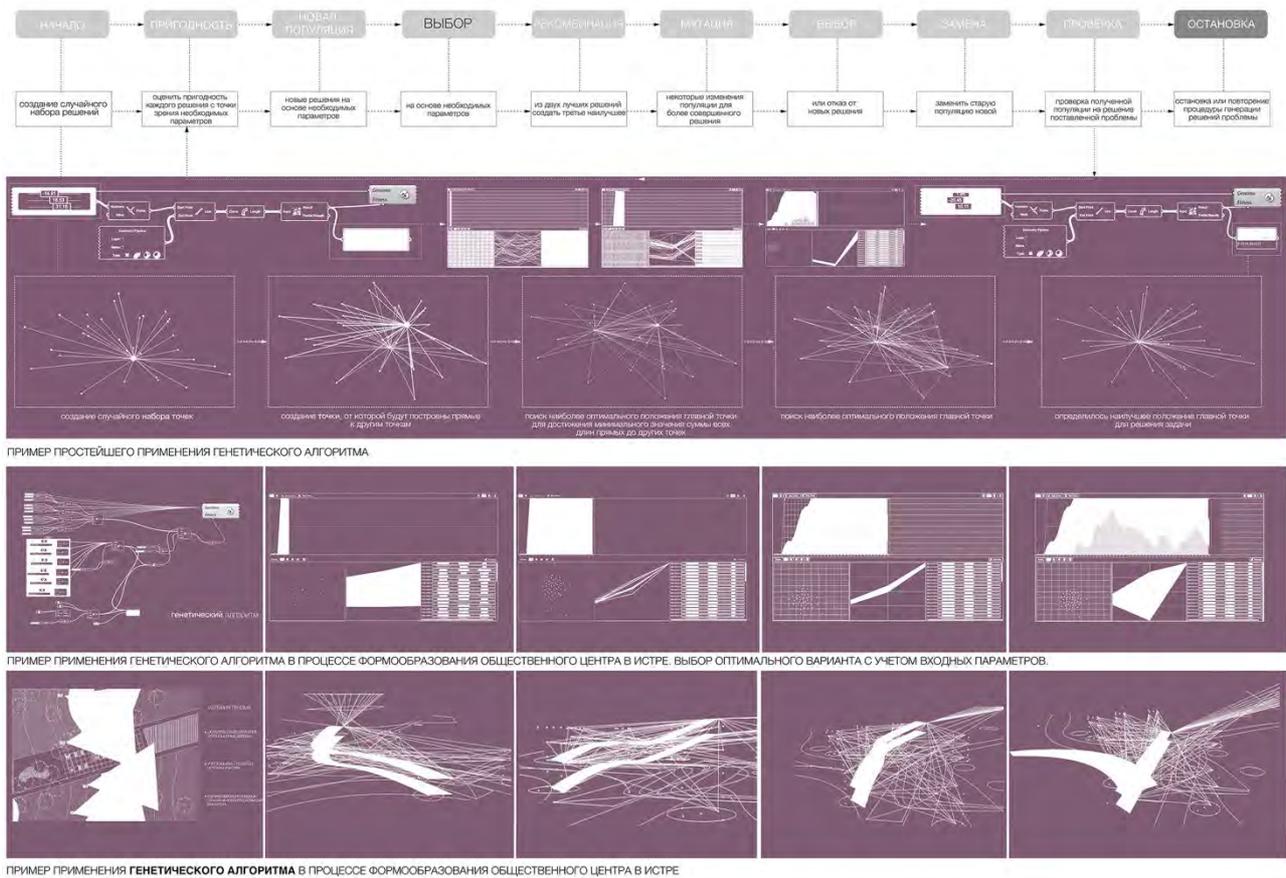


Рис. 118. Теоретическое и практическое объяснение генетических алгоритмов на примере формообразования Общественного центра в городе Истрие

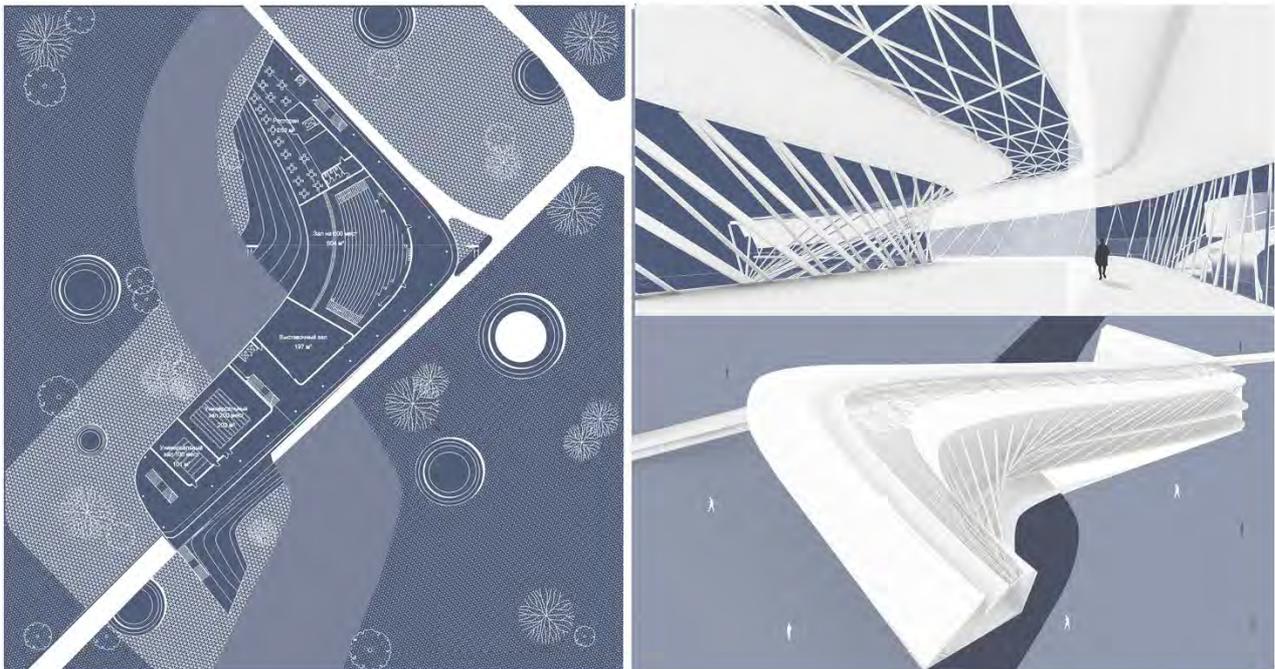


Рис. 119. Финальный результат формы, разработанной при помощи генетических алгоритмов

ОБЗОР ИНСТРУМЕНТОВ ОПТИМИЗАЦИИ И АНАЛИЗА

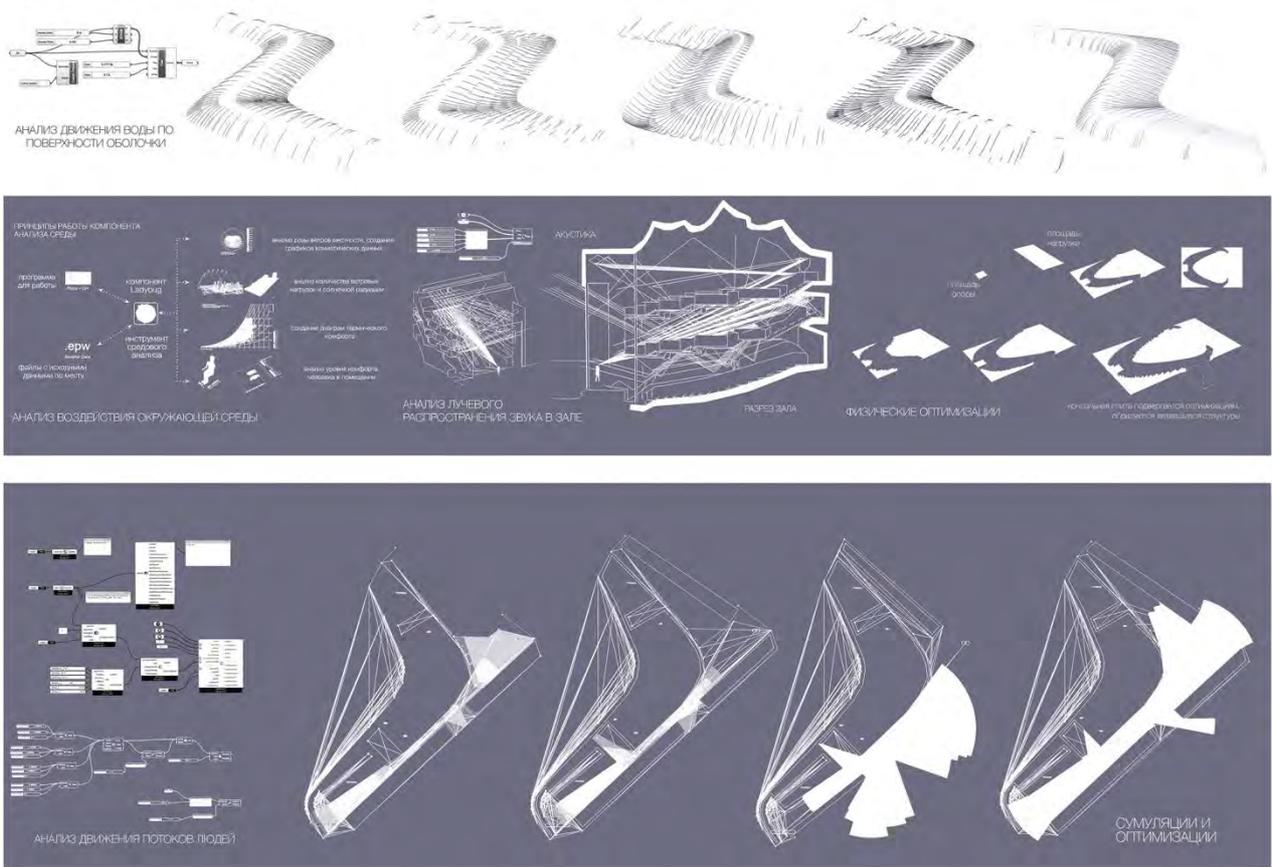


Рис. 120. Различные виды симуляций и оптимизаций геометрии Общественного центра в городе Истре, Московская область



Рис. 121. Проект Общественного центра в городе Истре, Московская область, после процесса оптимизации

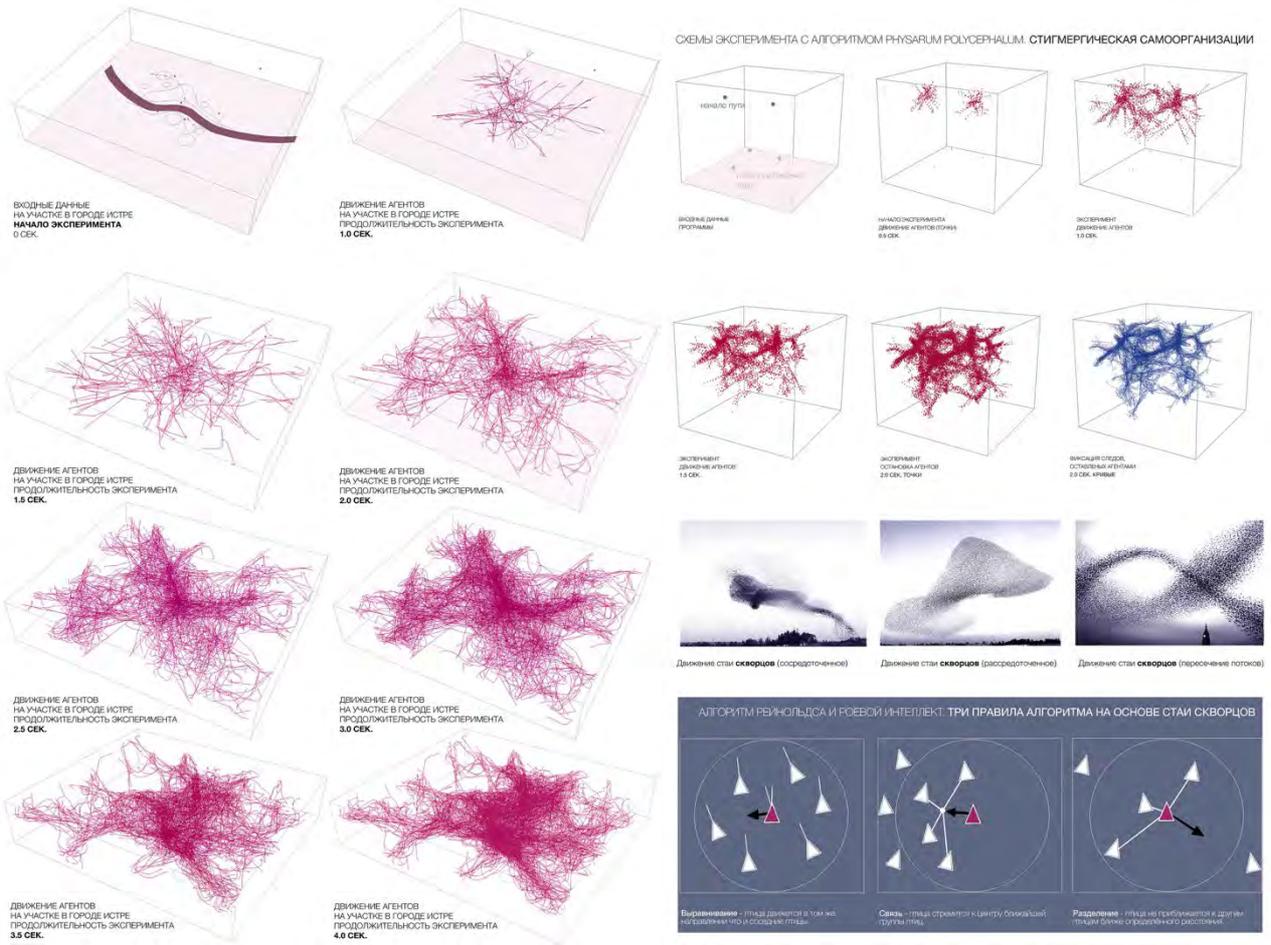


Рис. 122. Применение агентных систем при формировании Общественного центра в городе Истре



Рис. 123. Самоорганизация стаи скворцов

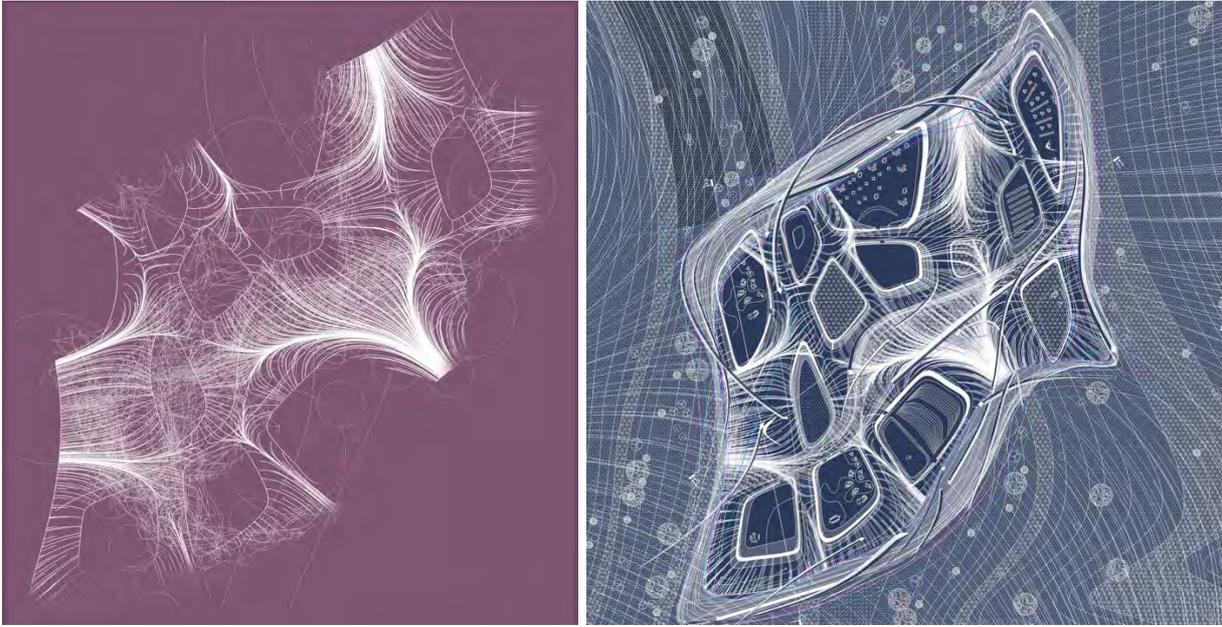
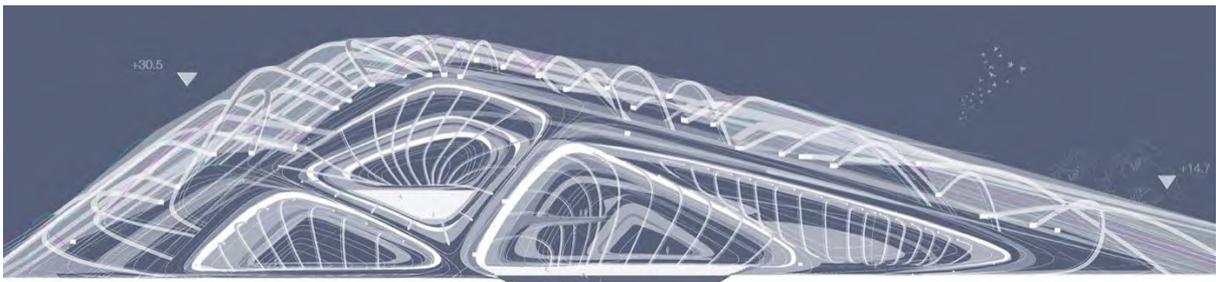
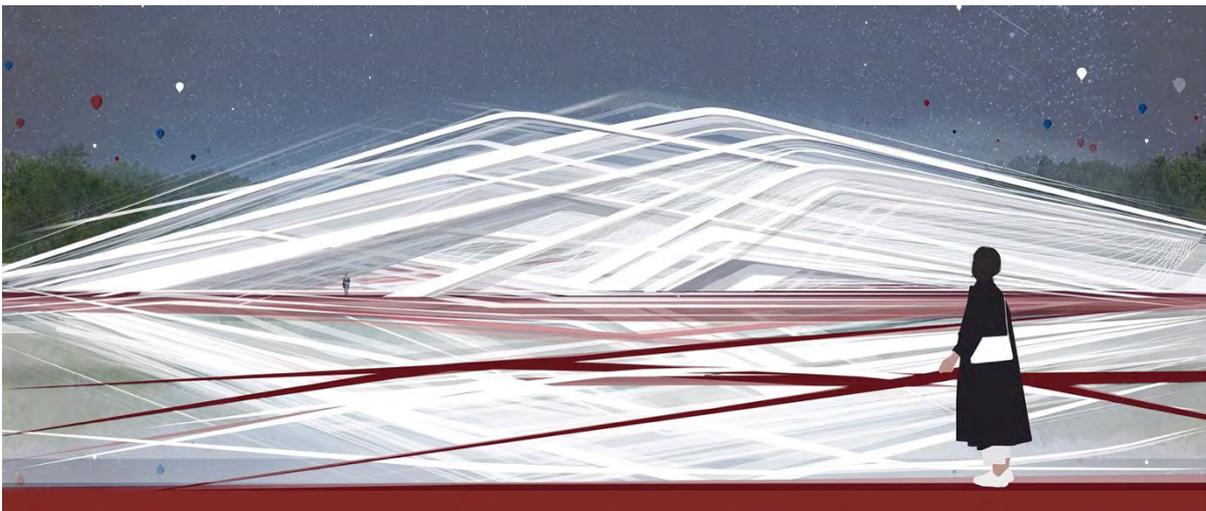


Рис. 124. Применение агентных систем при формообразовании объемно-планировочных решений Общественного центра в городе Истре



(a)



(b)

Рис. 125. Разрез (a) и фасад (b) Общественного центра в городе Истре

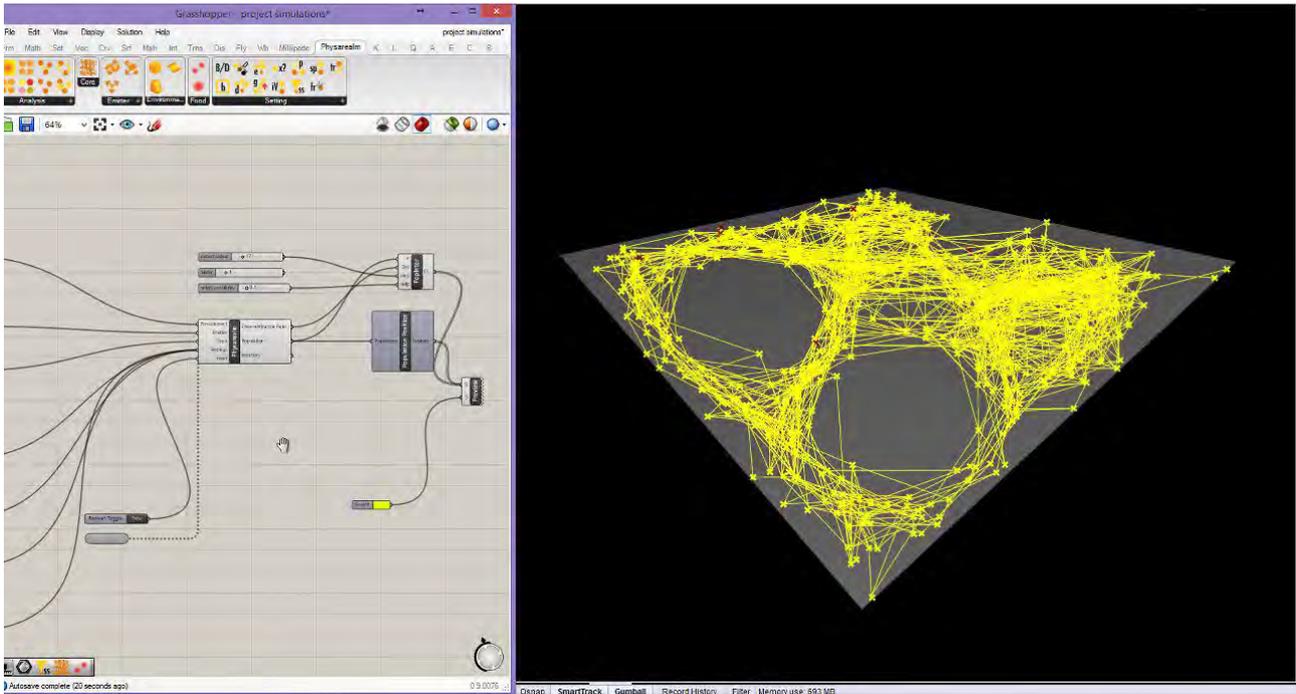


Рис. 126. Интерфейс программы Rhinoceros и плагина визуального программирования Grasshopper с компонентом Physarealm



Рис. 127. *P. Polyserphalum* – эукариотический микроорганизм

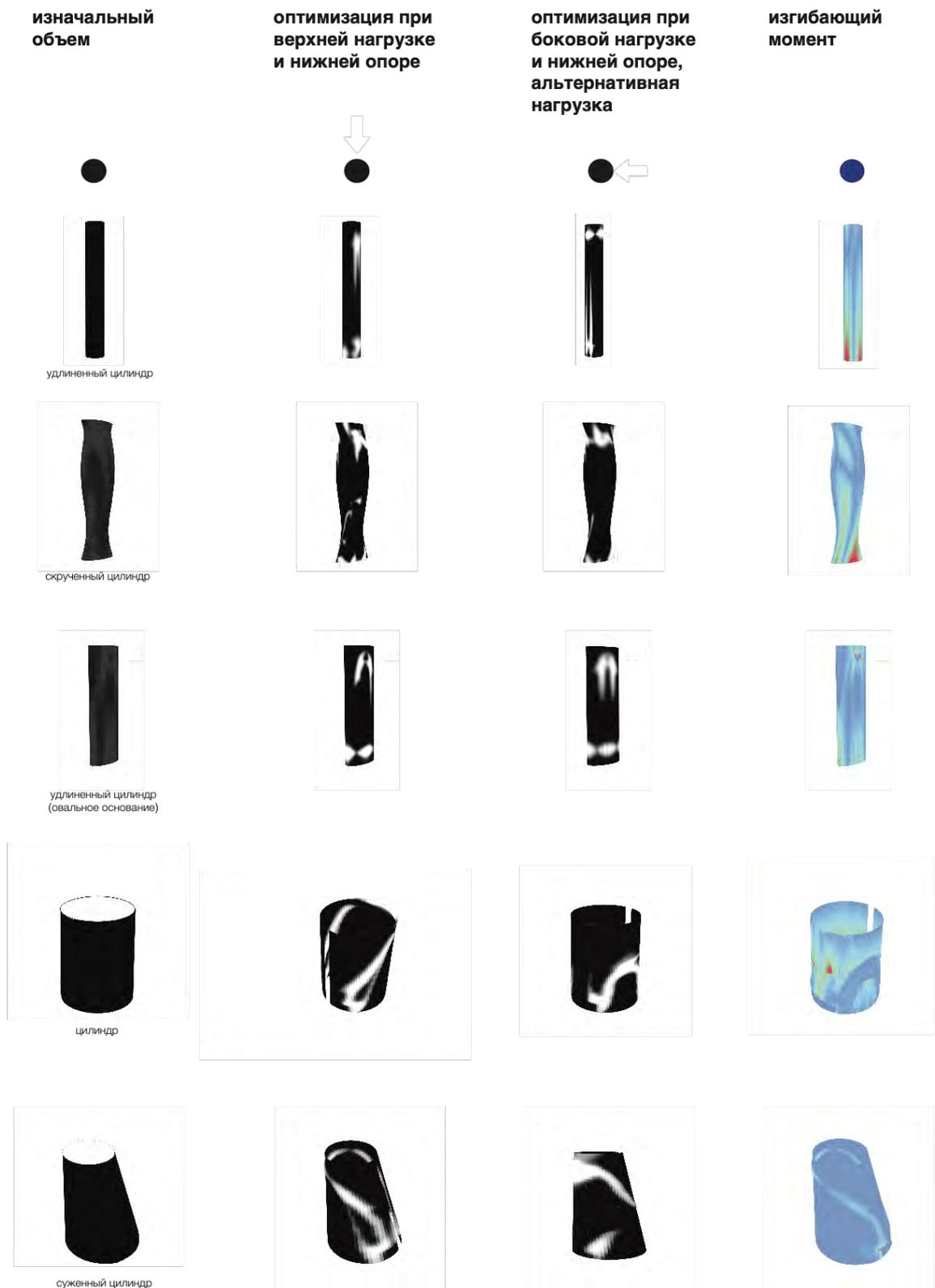


Рис. 128. Таблица результатов эксперимента с топологическими оптимизациями, за основу взята форма цилиндра



Рис. 129. Таблица результатов эксперимента с топологическими оптимизациями, за основу взяты различные геометрические формы

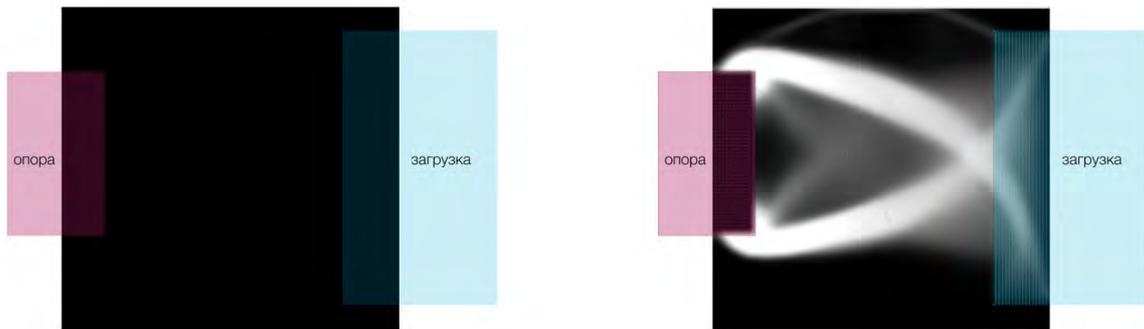


Рис. 130. Топологические оптимизации на плоском диске с применением плагина Millipede для Grasshopper программы Rhinoceros



Рис. 131. Серия топологических оптимизаций на плоском диске с применением плагина Millipede для Grasshopper программы Rhinoceros

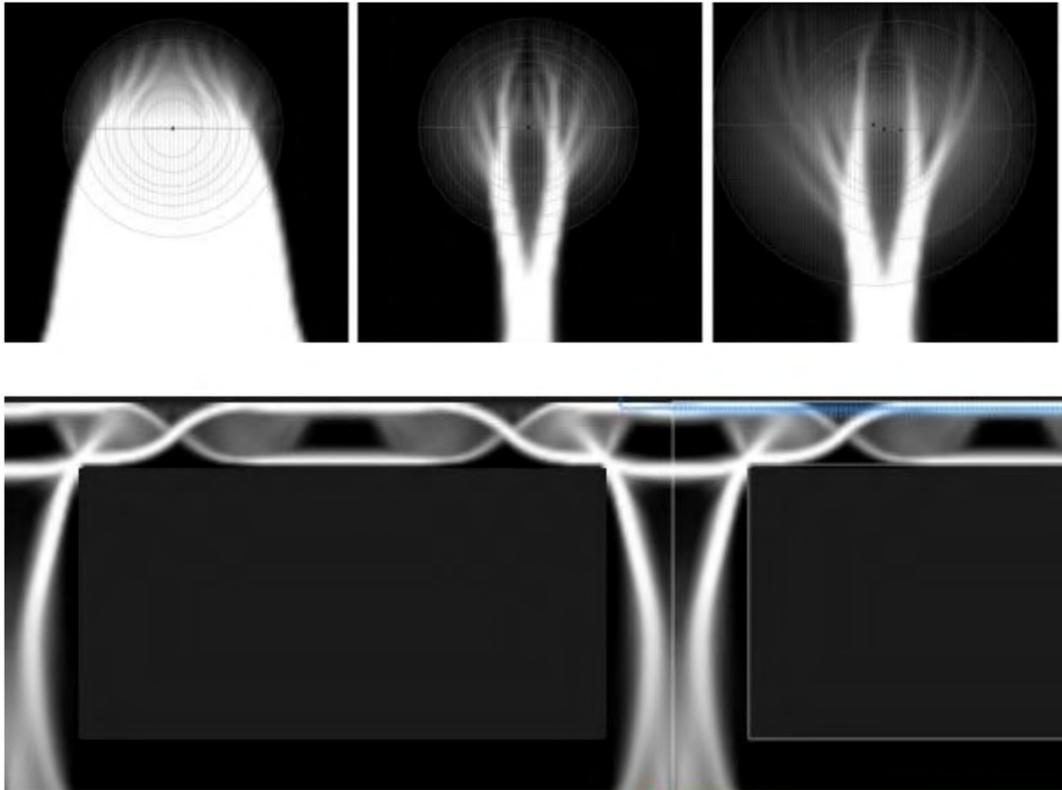


Рис. 132. Серия топологических оптимизаций на плоском диске с применением плагина Millipede для Grasshopper программы Rhinoceros

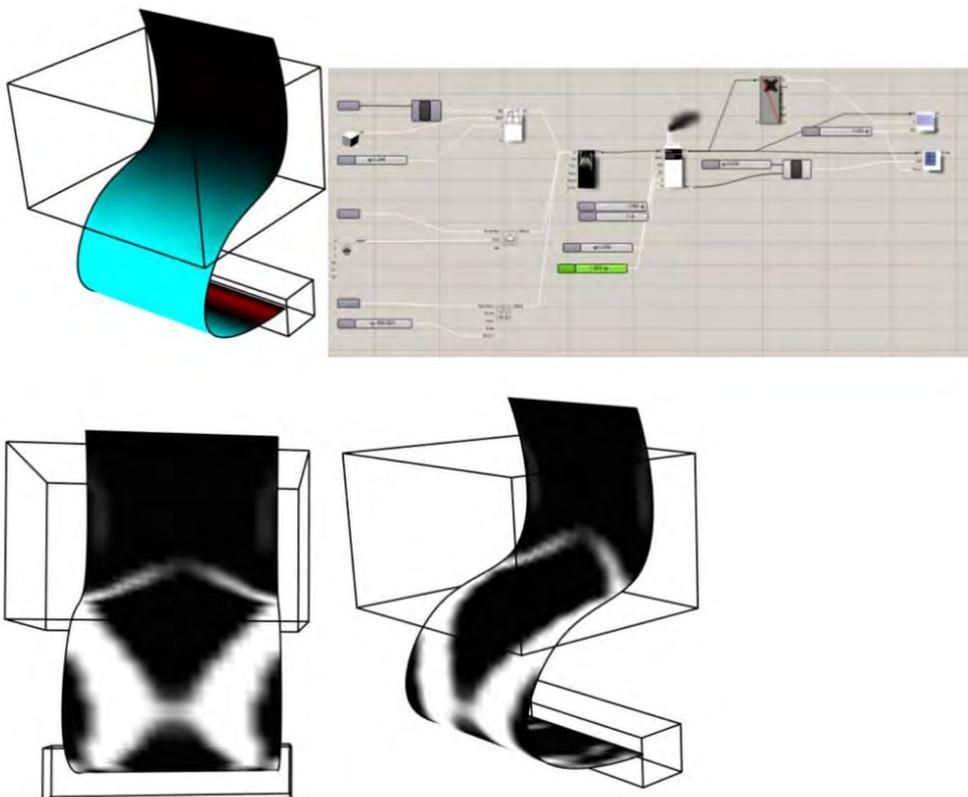


Рис. 133. Топологическая оптимизация геометрии стула с применением плагина Millipede для Grasshopper программы Rhinoceros

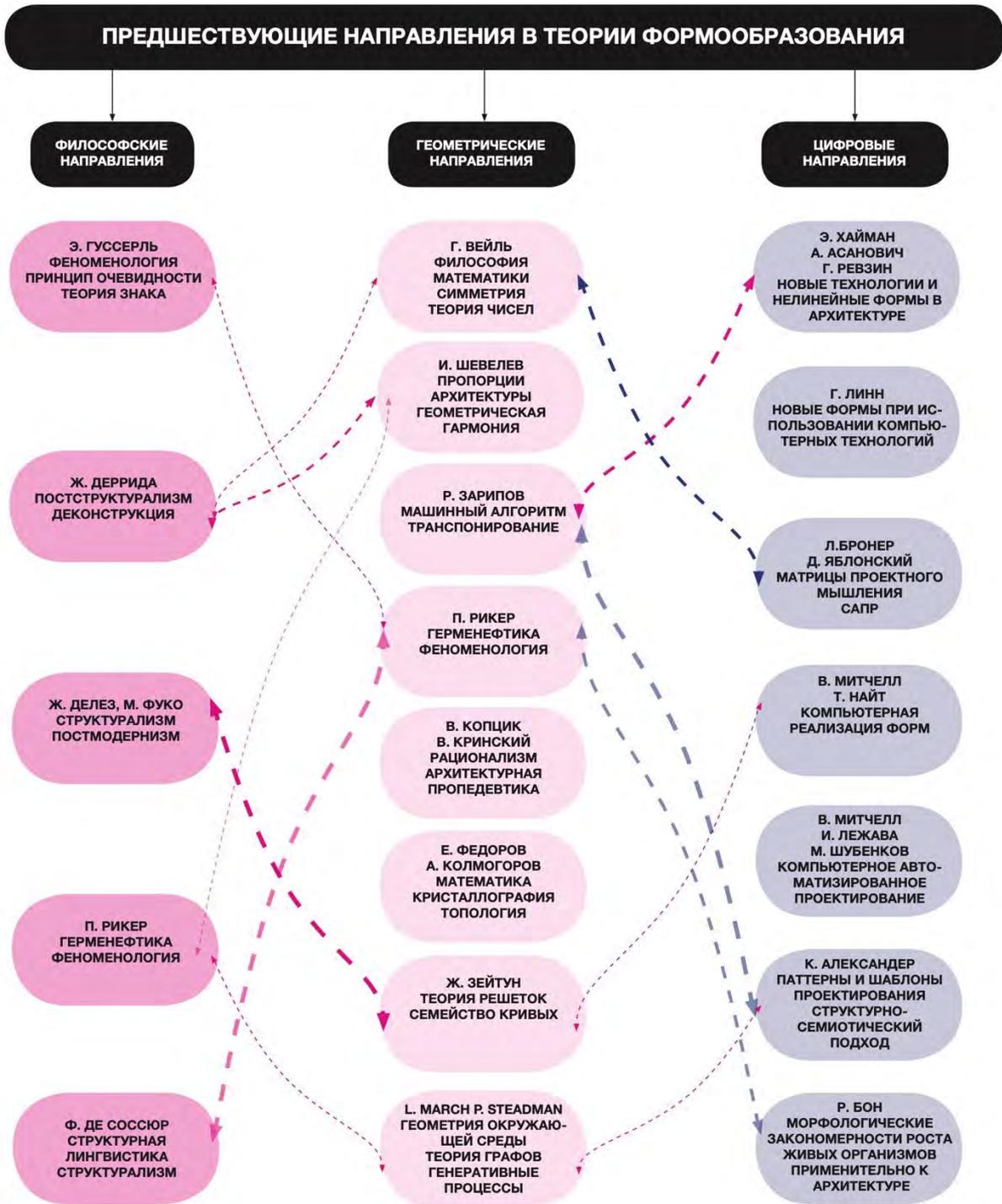


Рис. 134. Предшествующие направления и теории формобразования

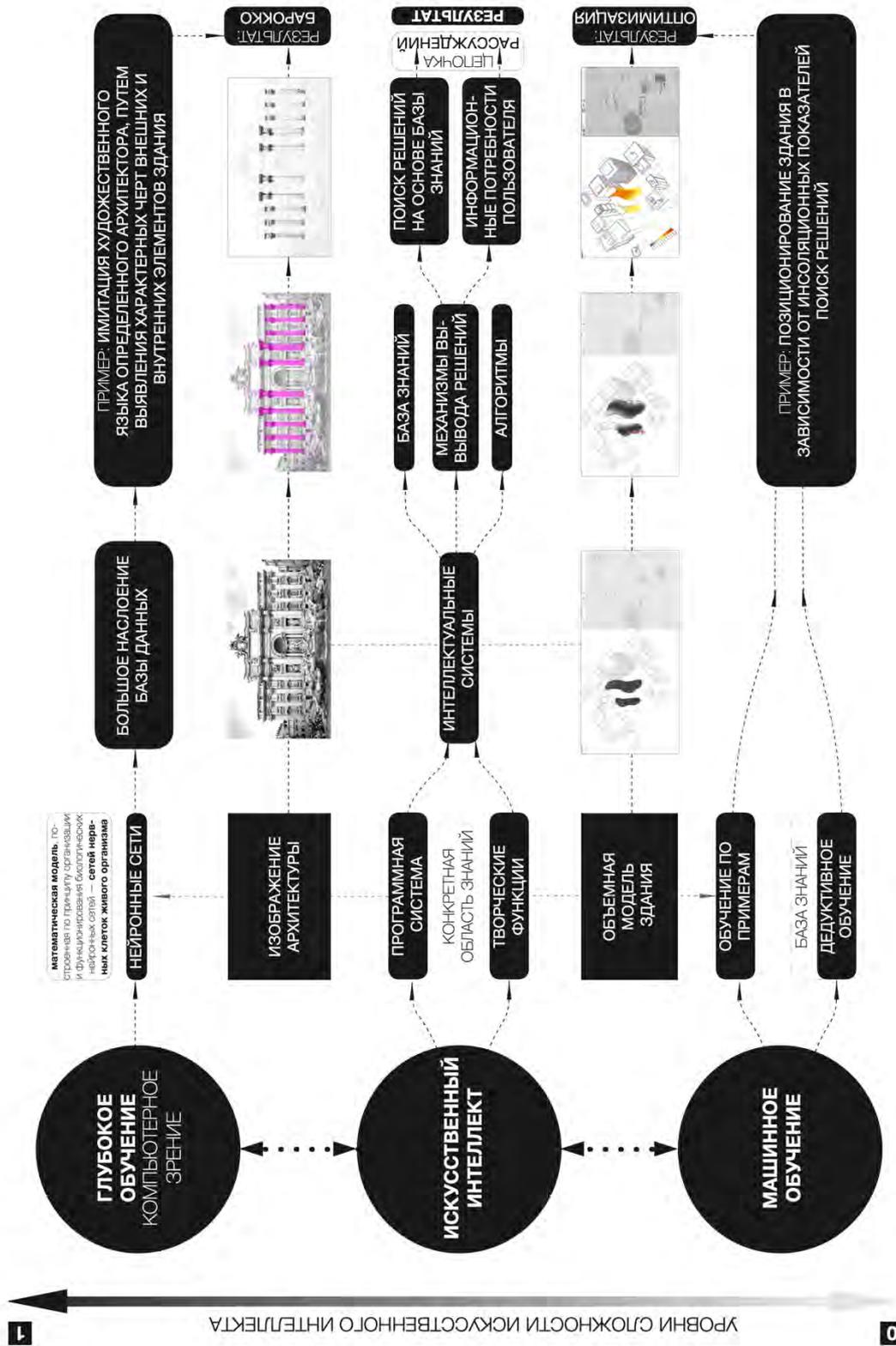


Рис. 135. Схема уровней сложности искусственного интеллекта

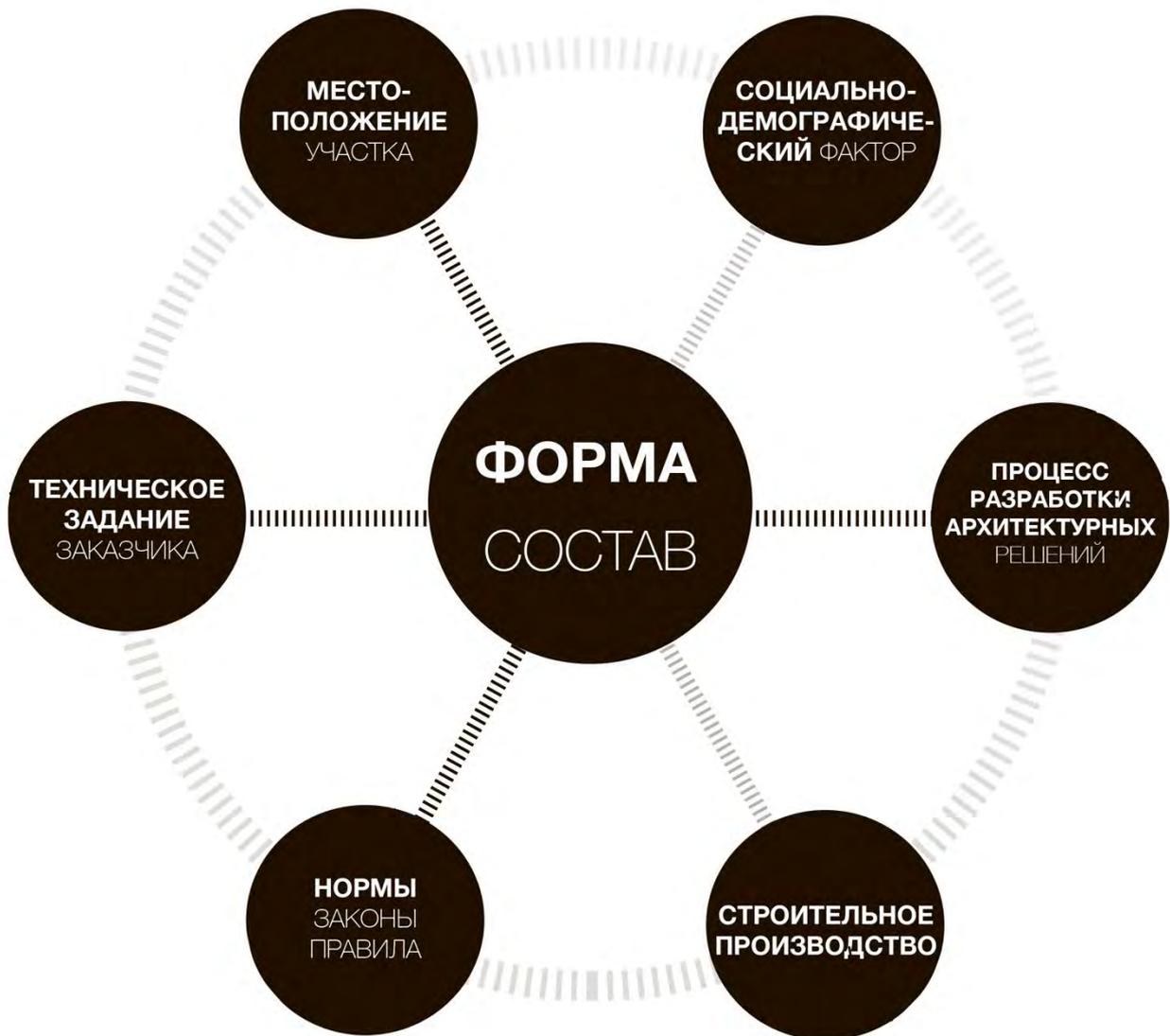
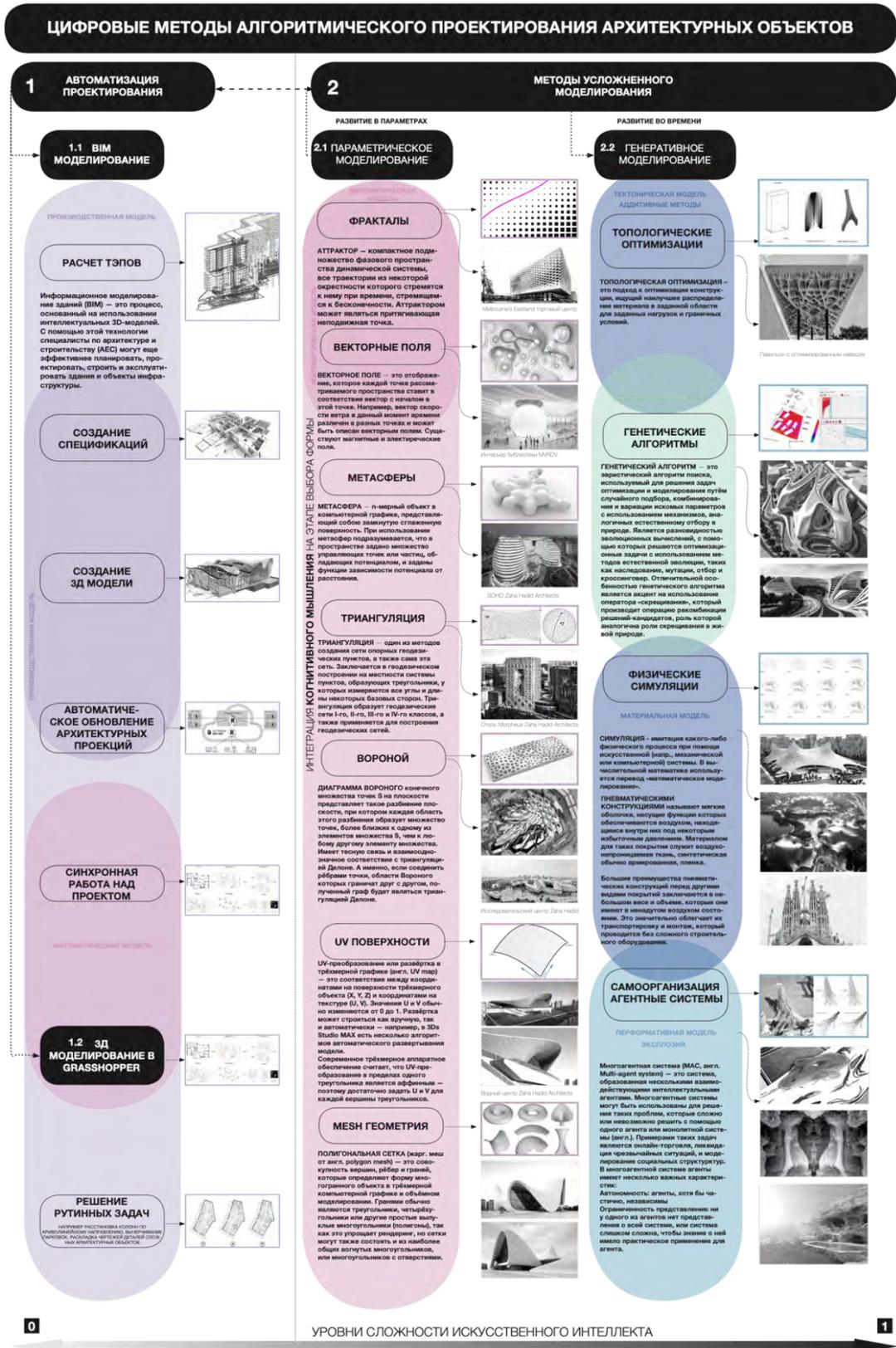


Рис. 136. Схема факторов формообразования

ЗАКЛЮЧЕНИЕ



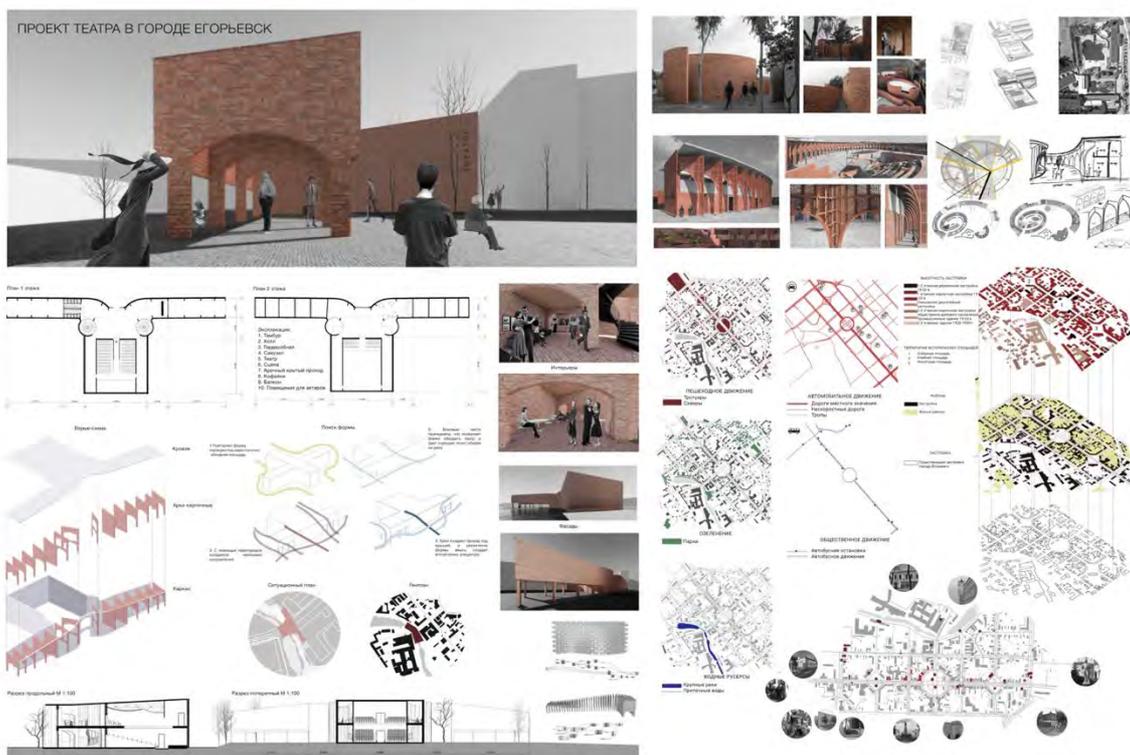


Рис. 138. Проект театра в рамках дисциплины “Цифровые средства”.
Студент 5-го курса РУДН А. Володина. Преподаватель М.С. Салех



Рис. 139. Проект театра в рамках дисциплины “Цифровые средства”.
Студент 5-го курса РУДН А. Хузиахметова. Преподаватель М.С. Салех

СПИСОК ТАБЛИЦ И ИЛЛЮСТРАЦИЙ

В диссертации использованы таблицы и рисунки:

1. Рис. 1. Вариации геометрических форм.
(<https://www.scoop.it/topic/architecture-by-hazem-bassal/p/4040184781/2015/03/29/siteless-1001-building-forms-francois-blanciak>)
2. Рис. 2. Здание Ichii Renovation с параметрическим фасадом, архитекторы PODA, Япония, 2013 (<https://www.modlar.com/photos/2031/ichii-renovation-exterior/>)
3. Рис. 3. Пример аттракторного процесса метода параметрического моделирования. Электронный учебник программы Grasshopper (<https://gozourworkshops.wordpress.com/2014/07/09/grasshopper-attractor-essentials/>)
4. Рис. 4. Пример аттракторного процесса метода параметрического моделирования с кодом в программе Grasshopper. Электронный учебник программы Grasshopper (<https://www.grasshopper3d.com/photo/dynamic-surface-03/next?context=user>)
5. Рис. 5. Пример аттракторного процесса метода параметрического моделирования с кодом в программе Grasshopper. Интерфейс программы. (<http://fabacademy.org/2019/labs/egypt/students/nada-abdelfattah/assignments/week03/>)
6. Рис. 6. Центр Гейдара Алиева в Баку. Zaha Hadid Architects, 2012 (https://www.architime.ru/specarch/zaha_hadid_architects_ha/heydar_aliyev_center.htm#1.jpg)
7. Рис. 7. Интерфейс программы Rhinoceros и плагина Grasshopper. Анализ инсоляции здания. (<https://www.youtube.com/watch?v=92cyBvHPSDs>)
8. Рис. 8. Анализ и раскладка наиболее оптимальных вариантов ориентации поверхности. Интерфейс программы Rhinoceros и плагина Grasshopper (<http://core.thorntontomasetti.com/design-explorer/>)

9. Рис. 9. Анализ и топологическая оптимизация конструктивных элементов (<https://www.pinterest.co.uk/pin/547539267182983404/>)
10. Рис. 10. Симуляции при поиске архитектурной формы. Интерфейс программы Rhinoceros и плагина Grasshopper (<https://www.albertopugnale.com/2013/03/29/form-finding-through-numerical-tools-comparison-between-karamba-and-kangaroo/>)
11. Рис. 11. Формообразование при помощи агентных систем, программа Processing (<http://www.iaacblog.com/programs/42500/>)
12. Рис. 12. Применение агентных систем для анализа движения воды по поверхности, программа Rhinoceros и Grasshopper (<http://www.synthetic.space/synthetic/2342/>)
13. Рис. 13. Самоорганизация стаи скворцов (<https://frayerman.livejournal.com/387721.html>)
14. Рис. 14. Обзор превращения каркасов из спонгина в карбонизированную трехмерную структуру при 1200 °C (<https://phys.org/news/2019-10-extreme-biomimetics-natural-sources-materials.html>)
15. Рис. 15. Изучение структуры морского ежа *Heterocentrotus mammillatus* (a), поперечное сечение позвоночника (b) и крупный план стереомной структуры (c), масштабная шкала = 1 мм. Впоследствии данные исследования использовались для создания генеративного павильона. Тюбингенский университет (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352012418301334>)
16. Рис. 16. Павильон Павильон Розенштейна, Университет Штутгарта, ILEK, 2012 (<https://www.facebook.com/ilek.uni.stuttgart/posts/rosenstein-pavilion-by-ilek-baubionik-exhibitionthe-special-exhibition-baubionik/1978400319073355/>)
17. Рис. 17. Возможности BIM-технологий на различных этапах здания (<https://ros-tim.ru/podrobneeobim>)
18. Рис. 18. Развитие индустрии с XVIII по XXI век (<https://4esnok.by/mneniya/beloruskaya-ekonomika-v-sledujushhej-pyatiletke-zastoj-ili-industriya-4-0/>)

19. Рис. 19. Характеристики и возможности индустрии 4.0 (<https://old.sk.ru/news/b/press/archive/2016/09/28/revolyuciya-v-deystvii-perehod-k-industrii-40.aspx>)
20. Рис. 20. FDM 3D-принтер (<https://ecodrift.ru/product/3d-printer-creality3d-ender-5/>)
21. Рис. 21. Многоосевая роботизированная рука на производстве павильона (<http://www.robarch2012.org/workshops>)
22. Рис. 22. Возведение моста при помощи 3D-принтера, команда MX3D, Амстердам (<https://www.pinterest.co.uk/pin/531495193507976302/>)
23. Рис. 23. Возведение павильона при помощи многоосевой роборуки, Университет Штутгарта (<https://netcomposites.com/news/sgl-carbon-fibre-employed-in-university-of-stuttgart-architectural-project/>)
24. Рис. 24. Античный амфитеатр Одеон, Греция (<http://legvmas.ru/history/albom351/photo7298/>)
25. Рис. 25. Подвесная модель собора Саграда Фамилия А. Гауди (<https://izi.travel/de/06e8-podvesnaya-serpnaya-model-antonio-gaudi/ru>)
26. Рис. 26. Перевернутая подвесная модель собора Саграда Фамилия (без грузиков) А. Гауди (<https://www.oknamedia.ru/novosti/okna-gaudi-prelomlenie-sveta-v-prostranstve-k-165-letiyu-so-dnya-rozhdeniya-46924>)
27. Рис. 27. Собора Саграда Фамилия А. Гауди, Барселона, Испания (<https://barcelonatm.ru/sobor-gaudi-v-barselone/>)
28. Рис. 28. Эксперименты Ф. Отто с мыльными пузырями при поиске формы (<https://www.pinterest.co.uk/pin/633387427804462/>)
29. Рис. 29. Олимпийский стадион в Мюнхене 1972 года (<https://arxip.com/project/229091/photo-olimpiyskiy-stadion-v-myunhene-foto-sdelano-s-vyisot-tsvetnaya-fotografiya-fotografii-v-puteshestvii-229091/>)
30. Рис. 30. Эксперименты Ф. Отто с нитями (слева – натянутые нити, справа – нити, опущенные в воду) (<http://emmelynchua.blogspot.com/2014/06/week-6-lure-of-continuous-skin.html>)

31. Рис. 31. Эксперименты Ф. Отто с клеем и тканью
(<https://i.pinning.com/originals/fd/f6/1c/fdf61c431835563651e4b2f8e791c05c.jpg>)
32. Рис. 32. Эксперименты Ф. Отто с песком
(<https://sandworks.wordpress.com/material-2/>)
33. Рис. 33. Геодезический купол Б. Фуллера
(https://bigenc.ru/fine_art/text/4725287)
34. Рис. 34. Большой двор Британского музея – реконструкция, Н. Фостер
(<https://weekend.rambler.ru/places/38914424-britanskiy-muzej/>)
35. Рис. 35. Макет бесконечного дома Ф. Кислера
(<https://www.nytimes.com/2015/08/28/arts/design/review-endless-house-expands-the-definition-of-home.html>)
36. Рис. 36. Чертеж бесконечного дома Ф. Кислера
(<https://www.archdaily.com/126651/ad-classics-endless-house-friedrick-kiesler/50380a4e28ba0d599b000ab8-ad-classics-endless-house-friedrick-kiesler-photo>)
37. Рис. 37. Проекция плана проекта Дворца Развлечений С. Прайса
(<https://medium.com/@michelle.yocelyn/fun-palace-8566c3adefae>)
38. Рис. 38. Проекция разреза проекта Дворца Развлечений С. Прайса
(<https://medium.com/@michelle.yocelyn/fun-palace-8566c3adefae>)
39. Рис. 39. Проект Дворца Развлечений С. Прайса
(<https://medium.com/@michelle.yocelyn/fun-palace-8566c3adefae>)
40. Рис. 40. Концертный зал Уолта Диснея в Лос-Анджелесе, Ф. Гэри
(<https://probauhaus.ru/disney-concert-hall/>)
41. Рис. 41. Модель концертного зала Уолта Диснея в программе Gehry Technologies (<https://interactive.wttw.com/tenbuildings/walt-disney-concert-hall>)
42. Рис. 42. Эскиз музея креативных процессов, З. Хадид
(<https://www.archdaily.com/798362/the-creative-process-of-zaha-hadid-as-revealed-through-her-paintings/57ebdc11e58ece95d90000ec-the-creative-process-of-zaha-hadid-as-revealed-through-her-paintings-image>)

43. Рис. 43. Композиция проун 1D, 1919, Э. Лисицкий (<https://www.the-village.ru/village/weekend/art/292512-malevich-lisitskiy>)
44. Рис. 44. Арабская каллиграфия (<http://www.islamisemya.com/arabskaya-kalligrafiya-ot-pisma-kochevnikov-k-iskusstvu.html>)
45. Рис. 45. Отель Morphosis в Макао, Китай, Zaha Hadid Architects (<https://wiki.mcneel.com/webinars/morpheus>)
46. Рис. 46. Интерьер отеля Morphosis в Макао, Китай, Zaha Hadid Architects (<https://www.zaha-hadid.com/architecture/city-of-dreams-hotel-tower-cotai-macau/>)
47. Рис. 47. Здание национального театра в Тайване, Т. Ито (<https://uk.phaidon.com/agenda/architecture/articles/2014/september/23/toyo-ito-creates-opera-house-from-sprayable-concrete/>)
48. Рис. 48. Процесс строительства национального театра в Тайване, Т. Ито (<https://uk.phaidon.com/agenda/architecture/articles/2014/september/23/toyo-ito-creates-opera-house-from-sprayable-concrete/>)
49. Рис. 49. Проект Национального конференц-центра в Дохе, А. Исодзаки, 2011 (<https://www.admagazine.ru/architecture/arata-isodzaki-postroil-gigantskij-centr>)
50. Рис. 50. Процесс формообразования проекта эмбриологического дома, Г. Линн (<https://studiointrex.wordpress.com/generative-systems-case-studies/>)
51. Рис. 51. Оперный театр в Харбине (Китай), MAD Architects (<https://inhabitat.com/mad-completes-the-undulating-harbin-opera-house-in-china/>)
52. Рис. 52. Проект Центра Гималаев Нанкин Зендай, MAD Architects (<https://uk.phaidon.com/agenda/architecture/articles/2014/june/18/mad-architects-talk-about-latest-project/>)
53. Рис. 53. Эксперименты архитектурного бюро Kokkugia в цифровом проектировании (<https://www.pinterest.co.uk/negrich/stephan-balleux/>)
54. Рис. 54. Проект национального музея в Китае (конкурс) (<http://www.rolandsnooks.com/#/namoc/>)
55. Рис. 55. Проект Digital Grotesque, М. Хансмейер (<https://www.arch2o.com/digital-grotesque-michael-hansmeyer-and-dylan-dillenburger/>)

56. Рис. 56. Схема частей проекта Digital Grottesque, М. Хансмейер (<http://pjhm.com/digital-grotesque-3d-printing/>)
57. Рис. 57. Оптимизация узла конструкции, компания Arup (<https://www.materialsforengineering.co.uk/engineering-materials-news/3d-printed-steel-bracket-yields-fresh-innovation-for-construction-giant/144975/>)
58. Рис. 58. Напряжение в [МПа], изначальная форма (слева), оптимизированный узел 1.0 (в центре) и новая форма узла оптимизация 2.0 (справа). Самые высокие напряжения наблюдаются у красного участка, самые низкие у синего участка (<http://ibdesigntech.com/3-4-computer-aided-design-cad-2/>)
59. Рис. 59. Рендер традиционной конструкции (слева) и оптимизированный элемент 2.0 (справа), показывающий узлы на конце стойки с соединительными кабелями и осветительной арматурой, компания Arup (Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2015, Amsterdam Future Visions)
60. Рис. 60. Изображение оптимизированного узла из нержавеющей стали с присоединением резьбовых обжимных концов к кабелям, световая арматура и распорка отсутствуют, компания Arup (Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2015, Amsterdam Future Visions)
61. Рис. 61. Проект ProtoHouse от студии Softkill Design, 2012 (<https://www.archdaily.com/335887/3-d-printing-protohouse-1-0-and-protohouse-2-0-softkill-design>)
62. Рис. 62. Схемы структуры проект ProtoHouse от студии Softkill Design, 2012 (<https://www.archdaily.com/335887/3-d-printing-protohouse-1-0-and-protohouse-2-0-softkill-design>)
63. Рис. 63. Элементы макета проекта ProtoHouse от студии Softkill Design, 3D-принтер (<https://www.dezeen.com/2012/10/23/protohouse-by-softkill-design/>)
64. Рис. 64. Макет проекта ProtoHouse от студии Softkill Design, 3D-принтер (<https://www.dezeen.com/2012/10/23/protohouse-by-softkill-design/>)
65. Рис. 65. Макет проекта ProtoHouse от студии Softkill Design, 3D-принтер (<https://www.dezeen.com/2012/10/23/protohouse-by-softkill-design/>)

66. Рис. 66. Макет проекта ProtoHouse от студии Softkill Design, 3D-принтер
(<https://www.dezeen.com/2012/10/23/protohouse-by-softkill-design/>)
67. Рис. 67. Павильон Розенштейна в Штутгарте, Германии, бюро ILEK. 2015
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352012418301334>)
68. Рис. 68. Павильон Розенштейна в Штутгарте, Германии, бюро ILEK. 2015,
вид снизу
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352012418301334>)
69. Рис. 69. Аксонометрический вид павильона Розенштейна в Штутгарте,
Германии, бюро ILEK, 2015
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352012418301334>)
70. Рис. 70. Морской еж *Heterocentrotus mammillatus* (a), поперечное сечение
позвоночника (b) и крупный план стереомной структуры (c), масштабная шкала
= 1 мм. Источник: AMIN, Университет Тюбингена
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352012418301334>)
71. Рис. 71. Методы опалубки для геометрически сложных бетонных
конструкций. Фрезерование опалубочной части, сборка двусторонней опалубки
для литья, вид тонкостенного бетонного сегмента
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352012418301334>)
72. Рис. 72. Схема распределения максимального и минимального главных
напряжений без натяжного кольца (a), (b) и с натяжным кольцом, с усилием
предварительного напряжения 4,5 кН (c), (d)
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352012418301334>)
73. Рис. 73. Материализация поля напряжений оболочки. Начальная
четырёхугольная сетка с векторами напряжений (a), популяция клеток в
соответствии с амплитудами и направлениями главных векторов напряжений (b),
моделирование требуемых сечений в соответствии с величинами главных
напряжений (c)
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352012418301334>)
74. Рис. 74. Сегментация макета оболочки
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352012418301334>)

75. Рис. 75. Павильон Розенштейна, вертикальные смещения сплошных (а) и пористых (б) оболочек, бюро ILEK, 2015 (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352012418301334>)
76. Рис. 76. Нелинейно вычисленные вертикальные смещения пористой сегментированной оболочки модели с полными контактными пружинами и металлическими крепежными элементами 50% (а) и 20% (б) соответственно (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352012418301334>)
77. Рис. 77. Сравнение конструктивного анализа в программе Millipede (а) и SOFISTIK для непрерывной оболочки (б) и пористой оболочки (с). Показаны максимальные (слева) и минимальные (справа) главные напряжения. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352012418301334>)
78. Рис. 78. Потолок здания DFAB House, Федеральный институт технологий в Цюрихе, 2017 (<https://www.empa.ch/web/nest/digital-fabrication>)
79. Рис. 79. Схема здания DFAB House, Федеральный институт технологий в Цюрихе, 2017 (<https://www.world-architects.com/en/architecture-news/found/dfab-house>)
80. Рис. 80. Инсталляция на фасаде концертного зала Уолта Диснея, Р. Анадол, 2018 (<http://refikanadol.com/works/melting-memories/>)
81. Рис. 81. Инсталляция на фасаде концертного зала Уолта Диснея, Р. Анадол, 2018 (<http://refikanadol.com/works/melting-memories/>)
82. Рис. 82. Своды музея Московского Кремля, Nowadays Office, 2020 (<https://nowadaysoffice.com/project/27>)
83. Рис. 83. Проекты павильонов EXPO 2017, Astana, АБ Новое (<https://archspeech.com/expo-astana/ot-sfery-k-cheloveku-4-obshhestvennyh-prostranstva>)
84. Рис. 84. Дом Near the Forest, SA Lab, 2015 (<https://salab.org/near-the-forest-rus>)
85. Рис. 85. Генерация формы в Galapagos, Grasshopper, дом Near the Forest, SA Lab, 2015 (<https://salab.org/near-the-forest-rus>)

86. Рис. 86. Правила самоорганизации движений птиц (скворцов) (Автор М.С. Салех)
87. Рис. 87. Движение стаи скворцов (<https://naukatv.ru/photo/project/462>)
88. Рис. 88. Центр Гейдара Алиева в Баку, Zaha Hadid Architects, 2013 (<https://archi.ru/projects/world/3369/kulturnyi-centr-geidara-alieva>)
89. Интерфейс программы Rhinoceros и инструмента визуального программирования Grasshopper (<https://www.pinterest.co.uk/pin/308144799490759660/>)
90. Рис. 90. Создание вариантов небоскреба путем применения генеративных алгоритмов, Нейт Холланд, Университет Небраски – Линкольн, 2011 (http://papers.cumincad.org/data/works/att/acadiaregional2011_015.content.pdf)
91. Рис. 91. Создание вариантов планировок небоскреба путем применения генеративных алгоритмов, Нейт Холланд, Университет Небраски – Линкольн, 2011 (http://papers.cumincad.org/data/works/att/acadiaregional2011_015.content.pdf)
92. Рис. 92. Создание вариантов планировок небоскреба путем применения генеративных алгоритмов, Нейт Холланд, Университет Небраски – Линкольн, 2011 (http://papers.cumincad.org/data/works/att/acadiaregional2011_015.content.pdf)
93. Рис. 93. Создание вариантов форм небоскреба путем применения генеративных алгоритмов, Нейт Холланд, Университет Небраски – Линкольн, 2011 (http://papers.cumincad.org/data/works/att/acadiaregional2011_015.content.pdf)
94. Рис. 94. Пожарная часть Vitra, 1991–1993. Zaha Hadid Architects (<http://www.sobaka.ru/events/lecture/13867>)
95. Отель Морфеус, интерьер, Zaha Hadid Architects, Китай, 2018 (https://www.architime.ru/news/zaha_hadid_architects_/morpheus.htm#27.jpg)
96. Zaha Hadid Architects, Мастер план района Картал-Пендик в Стамбуле, Турция 2006 (<http://www.hiteca.ru/2013/10/manifesto.html>)
97. Рис. 97. Zaha Hadid Architects, Мастер-план района Картал-Пендик в Стамбуле, Турция, 2006 (<https://www.zaha-hadid.com/masterplans/kartal-pendik-masterplan/>)
98. Рис. 98. Основные направления цифровых методов (Автор М.С. Салех)

99. Рис. 99. Внедрение цифровых методов на различных этапах архитектурного проектирования (Автор М.С. Салех)
100. Рис. 100. Хронотоп – платформа компании Habidatum, данные за определенное время и в определенном месте (<https://habidatum.com/>)
101. Рис. 101. Интерфейс программы Хронотоп, данные за определенное время и в определенном месте (<https://habidatum.com/>)
102. Рис. 102. Генерация архитектурной формы на основе климатических особенностей участка проектирования, интерфейс программы Grasshopper (<https://www.youtube.com/watch?v=YC-rLrs6IE8>)
103. Рис. 103. Генерация архитектурной формы на основе заданных правил и эволюционных алгоритмов, интерфейс программы Grasshopper (<http://www.iaacblog.com/programs/interlop-workflows/>)
104. Рис. 104. Формирование архитектурного объема путем внедрения физических симуляций, интерфейс программы Grasshopper, плагин Kangaroo (<https://www.albertopugnale.com/2013/03/29/form-finding-through-numerical-tools-comparison-between-karamba-and-kangaroo/>)
105. Рис. 105. Первичная конструктивная оптимизация разработанной архитектурной формы, плагин Karamba и Galapagos (https://www.youtube.com/watch?v=s_iftTRW1j8)
106. Рис. 106. BIM-модель здания (<https://www.united-bim.com/portfolio/fairfield-inn-and-suites-mep/>)
107. Рис. 107. Алгоритмическое моделирование элементов здания (деталей фасада), отель Морфеус, Zaha Hadid Architects, Китай, 2018 (<https://www.skyscrapercity.com/threads/city-of-dreams.213977/page-4>)
108. Рис. 108. Инструменты цифрового производства, роботизированная рука, 2015 (<https://fortune.com/2015/07/30/chattanooga-3d-printed-house/>)
109. Рис. 109. Подготовка цифровой модели в программе Rhinoceros к процессу производства (<https://peatix.com/event/288730>)

110. Рис. 110. Цифровое производство, роботизированная рука, создание инсталляций (<https://www.archdaily.com/940530/an-overview-of-digital-fabrication-in-architecture>)
111. Рис. 111. Слева направо: эксперименты по поиску формы с тканью, стекловолокном и листами APET (<https://www.semanticscholar.org/paper/FORM-FINDING-WITH-ROBOTICS-Fusing-Physical-and-Xia-Koh/9eb744ac960a6aecc15501f0d90ad3241e6b4d49>)
112. Рис. 112. Обзорная схема процесса, включая термоформование, литье и монтаж (<https://www.semanticscholar.org/paper/FORM-FINDING-WITH-ROBOTICS-Fusing-Physical-and-Xia-Koh/9eb744ac960a6aecc15501f0d90ad3241e6b4d49>)
113. Рис. 113. Обзор формовки и литья с использованием армированного стекловолокном белого цемента (<https://www.semanticscholar.org/paper/FORM-FINDING-WITH-ROBOTICS-Fusing-Physical-and-Xia-Koh/9eb744ac960a6aecc15501f0d90ad3241e6b4d49>)
114. Рис. 114. Карта города Истра, Московская область (Автор М.С. Салех)
115. Рис. 115. Карта города Истра, Московская область, с анализом окружающей застройки проектируемого участка и распределением социальных групп в пределах 1 км от участка (Автор М.С. Салех)
116. Рис. 116. Первая итерация формы Общественного центра в городе Истре (Автор М.С. Салех)
117. Рис. 117. Основные правила работы алгоритмов в процессе формообразования (Автор М.С. Салех)
118. Рис. 118. Теоретическое и практическое объяснение генетических алгоритмов на примере формообразования Общественного центра в городе Истре, Московская область (Автор М.С. Салех)
119. Рис. 119. Финальный результат формы, разработанной при помощи генетических алгоритмов (Автор М.С. Салех)
120. Рис. 120. Различные виды симуляций и оптимизаций геометрии Общественного центра в городе Истре (Автор М.С. Салех)

121. Рис. 121. Проект Общественного центра в городе Истре после процесса оптимизации (Автор М.С. Салех)
122. Рис. 122. Применение агентных систем при формообразовании Общественного центра в городе Истре (Автор М.С. Салех)
123. Рис. 123. Самоорганизация стаи скворцов (https://www3.diism.unisi.it/~mocenni/COMPLEX_SYSTEMS_2016_2017.pdf)
124. Рис. 124. Применение агентных систем при формообразовании объемно-планировочных решений Общественного центра в городе Истре (Автор М.С. Салех)
125. Рис. 125. Разрез (а) и фасад (b) Общественного центра в городе Истре (Автор М.С. Салех)
126. Рис. 126. Интерфейс программы Rhinoceros и плагина визуального программирования Grasshopper с компонентом Physarealm (<https://www.youtube.com/watch?v=fZqn8Rk1Xho>)
127. Рис. 127. P. Polycerhalum – эукариотический микроорганизм (<http://sitn.hms.harvard.edu/flash/2016/slime-molds-capable-passing-learned-behaviors-new-cell-populations/>)
128. Рис. 128. Таблица результатов эксперимента с топологическими оптимизациями, за основу взята форма цилиндра (Автор М.С. Салех)
129. Рис. 129. Таблица результатов эксперимента с топологическими оптимизациями, за основу взяты различные геометрические формы (Автор М.С. Салех)
130. Рис. 130. Топологические оптимизации на плоском диске с применением плагина Millipede для Grasshopper программы Rhinoceros (Автор М.С. Салех)
131. Рис. 131. Серия топологических оптимизаций на плоском диске с применением плагина Millipede для Grasshopper программы Rhinoceros (Автор М.С. Салех)
132. Рис. 132. Серия топологических оптимизаций на плоском диске с применением плагина Millipede для Grasshopper программы Rhinoceros (<http://www.sawapan.eu/>)

133. Рис. 133. Топологическая оптимизация геометрии стула с применением плагина Millipede для Grasshopper программы Rhinoceros (<http://www.sawapan.eu/>)

134. Рис. 134. Предшествующие направления и теории формообразования (Автор М.С. Салех)

135. Рис. 135. Схема уровней сложности искусственного интеллекта (Автор М.С. Салех)

136. Рис. 136. Схема факторов формообразования (Автор М.С. Салех)

137. Рис. 137. Схема цифровых методов алгоритмического проектирования (Автор М.С. Салех)

138. Рис. 138–141. Проекты театра в рамках дисциплины “Цифровые средства” работы студентов 5-го курса РУДН А. Володина, А. Хузиахметова, К. Топал, Л. Когония. Преподаватель М.С. Салех