

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

МОСКОВСКИЙ АРХИТЕКТУРНЫЙ ИНСТИТУТ
(государственная академия)

Направление подготовки: АРХИТЕКТУРА 07.06.01

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
об основных результатах
подготовленной научно-квалификационной работы (диссертации)

На тему **МЕТОДЫ АРХИТЕКТУРНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ**
НА ОСНОВЕ ГЕНЕРАТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аспирант САЛЕХ Мария Сальвановна



Научная специальность 2.1.11 (05.23.20) Теория и история архитектуры,
реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия

Научный руководитель: Сапрыкина Наталия Алексеевна,
доктор архитектуры, профессор



Кафедра подготовки «Основы архитектурного проектирования»

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Исследование посвящено поиску и анализу новых методов проектирования в контексте процесса архитектурного формообразования. В рамках исследования рассматриваются развивающиеся компьютерные технологии (генеративные методы¹, алгоритмизация² процессов формообразования, кинетика, биомиметика, агентные системы³, искусственный интеллект⁴ и т.д.). Новые цифровые технологии расширяют арсенал инструментов и методов поиска архитектурной формы, позволяя не только сократить временные, экономические затраты, но и привнести новую эстетику в формирование архитектурных образов. Современные компьютерные технологии дают возможность генерировать большое количество проектных вариантов, которые впоследствии можно оптимизировать исходя из конструктивных, экономических и социальных показателей.

Актуальность исследования

Тема исследования актуальна, так как посвящена проблеме архитектурного формообразования, которое лежит в основе процесса проектирования. Развитие информационных технологий и научно-технический прогресс дают неисчерпаемые возможности создания новой классификации композиционных методов архитектурного формообразования. Архитектура в совокупности с современными цифровыми технологиями формирует новый тип архитектурного мышления. На сегодняшний день архитектурная деятельность постоянно пополняется новыми инновационными инструментами и методами проектирования, однако до сих пор не было четкой классификации и структуризации появляющихся методов.

На ранних этапах возникновения цифровых методов актуально выявить иерархию типов всех инструментов с целью определения для них оптимальных задач, создать базу проведенных экспериментов и результатов на основе новейших методов. Актуальность темы также заключается в выборе и оценке потенциала современных цифровых инструментов, возможном их сравнении для решения одинаковых задач. Цифровые методы (рис.5) дают возможность генерации таких архи-

¹ Процесс компьютерного моделирования на основе инструментов машинного обучения и искусственного интеллекта. - 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.

² Написание компьютерного кода, который пошагово описывает действие определенной программы. - Sakamoto, T. From Control to Design: Parametric / T. Sakamoto // Algorithmic Architecture. Barcelona: Actar. -2008.

³ Системы моделирования, которые работают на основе процессов, характерных природным организмам. - Friesen, M.R. A Survey of Agent-Based Modeling of Hospital Environments / M.R. Friesen // IEEE Access. -2014. - P. 227-233.

⁴Способность компьютерных систем выполнять творческие и интеллектуальные функции, которые традиционно считаются человеческими. - 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.

тектурных форм, которые невозможно так быстро придумать архитектору, назначая исходные данные (правила и ограничения) для работы программного алгоритма.

Стоит отдельно выделить термин «генерация». Генерация – это совокупность особей одного биологического вида, появившихся на свет в одно время, поколение. В том случае, если проецировать этот термин на программирование, то, под термином «генерация» подразумевают создание цифровой модели на основе определенного алгоритма, который действует по заранее сформулированным законам. Такой подход активно применяют в компьютерном проектировании архитектуры, отсюда термин – «генеративное моделирование». Генеративное моделирование – это процесс, при котором архитектор прописывает алгоритм того, что он хочет получить, задавая входные данные, а в результате получает определённые решения, которые и являются генерацией (созданием) множества вариантов цифровых моделей.

Методологической основой исследования стали труды, посвященные научным поискам в области цифрового формообразования и прогрессивной архитектуры таких зарубежных авторов, как Антонио Гауди, Арчим Менгес, Фрай Отто, Даниэль Пайкер, Хани Рашид, Заха Хадид, Патрик Шумахер.

Теоретическая база исследования и степень научной разработанности

В процессе проектирования можно выявить широкий спектр факторов, которые влияют на архитектуру: климат, движение потоков людей, рельеф местности, особенности участка проектирования и многое другое (рис.4). Вычислительная парадигма внесла генеративные и параметрические методы, внедрение которых может дать новые возможности для архитектурного творчества и процесса работы над проектом. Современные архитекторы-программисты занимаются исследованиями цифровых методов в контексте архитектурного формообразования. Такие исследования в основном начались после цифровой революции XX века.

Научно-технический прогресс побуждал архитекторов к развитию архитектурных методов и сокращению сроков проектирования при решении сложных задач. Основным процесс внедрения программирования в архитектуру приходится на 80-90 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, такого как Gehry Technologies. В основу данного продукта легли вычислительные инструменты, которые использовали при расчете самолетов.

Последствия цифровой революции стали основой для компьютерных экспериментов. Например, учёный Рейнольдс наблюдал и изучал движение птиц, а затем алгоритмизировал их поведение на компьютере – такой подход являлся преобразованием одного из генеративных методов (агентных систем). Начало XXI века характеризуется появлением большого количества сложных деконструктивистских архитектурных объектов (таких архитекторов как Zaha Hadid Architects, Тойо Ито, Грег Линн и т.д.). Таким образом, ускорился процесс адаптации цифровых методов для расчета сложных архитектурных объектов.

Кроме того, появилось большое количество исследовательских программ в таких институтах, как АА, MIT, 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 кинетического моделирования, влиянии внедрения принципов природных процессов на формообразование, материалы и применение их свойств в архитектуре, а также адаптации архитектурных объектов под существующий контекст. Вышеперечисленные исследования были бы невозможны без использования соответствующего компьютерного инструмента. 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 отдельно отметить работу бюро Zaha Hadid Architects и, в частности, Патрика Шумахера, который создал «Манифест параметризма», где подробно описаны основные постулаты и правила действия в данном направлении.

Кроме того, существуют архитекторы-программисты, 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. Вопросами осмысления проявлений новых теорий и технологий в современном проектировании и новых «нелинейных» (дигитальных, компьютерных) форм в архитектуре занимались И.А. Добрицына, Н.В. Касьянов, Н.А. Рочегова, Е.В. Барчугова, Э.В. Хайман, Г.И. Ревзин, В.А. Юзбашев, О.Г. Яцок, В.Э. Волынский и др.

Диссертационное исследование опирается на теоретические положения, изложенные в работах С.О. Хан-Магомедова, А.И. Каплуна, А.Г. Раппапорта, И.А. Азизян, А.В. Иконникова, А.В. Рябушина, А.Н. Шукуровой, В.Л. Хайта. Наряду с общетеоретическими работами были привлечены исследования, связанные с поиском «матриц проектного мышления»⁵, «проектного языка», разработкой программ «автоматизированных средств проектирования объектов строительства» (АСПОС), «систем автоматизированного проектирования»⁶ (САПР), представленные в работах Л.Н. Авдоткина, Л.Д. Бронера, Э.П. Григорьева, А.Э. Гутнова, Н.Н. Ноткина, Е.П. Костогаровой, В.И. Ретинского, А.П. Рома, Д.Н. Яблонского. Некоторые исследователи (например, Нил Лич, Роланд Снукс) занимаются внедрением искус-

⁵ Орлов В.И. Развитие объекта проектирования в ходе проектного поиска. Автореф. дис. канд. архитектуры. – М.: МАрХИ, 1982. – 24 с.

⁶ Везденева Е.Г. Информационные основы цифрового моделирования и графического описания городских территорий. Автореферат дис. канд. Архитектуры. – М.: МАрХИ, 1988.

ственного интеллекта (рис.3), что позволит научить компьютер решать задачи в получении архитектурной формы на основе пространственной композиции.

Вышеперечисленные исследования свидетельствуют о важности разработки и актуальности выбранной темы. За постоянным развитием технологий следуют новые разработки цифровых инструментов и методов, которые внедряются для решения архитектурных задач. В связи с этим важно структурировать и классифицировать полученные знания о цифровых методах архитектурного формообразования, понять перспективные направления данной темы и четко соотнести метод с задачами.

Таким образом, станет понятным, какие сферы архитектурной деятельности требуют применения соответствующих инструментов и методов.

Научное значение исследования заключается в классификации методов и приемов поиска архитектурной формы на основе генеративного моделирования.

Прикладное значение результатов исследования опирается на использовании прогрессивных методов с целью поиска архитектурной формы на основе генеративного моделирования.

Новизна

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

Гипотеза исследования

Внедрение искусственного интеллекта способно изменить процесс компьютерного формообразования. Искусственный интеллект возможно использовать для обработки больших массивов данных и на их основе выявлять и применять средства архитектурной композиции при генерации проектного решения. Использование принципов формирования природных процессов в генеративном моделировании сможет повлиять на форму архитектурного объекта, приблизив образ к природной эстетике.

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.
2. Выявление основных направлений генеративного моделирования и его влияния на современное формообразование в архитектуре. Анализ возможностей искусственного интеллекта в рамках архитектурного проектирования.

3. Разработка методов поиска архитектурной формы в зависимости от исходных параметров, проверка выявленных методов на экспериментальных моделях.

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

Предметом исследования являются методы архитектурного формообразования на основе генеративного моделирования.

Границы исследования

Хронологические 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 эволюция развития цифровых методов. Отмечаются архитекторы, которые существенно повлияли на формирование определенного направления цифровых методов. Выделяются периоды пика научно-технического прогресса и их влияние на развитие новых вычислительных методов.

В исследовании в основном рассмотрены работы зарубежных архитекторов, практикующих генеративные и параметрические методы. Исследование и проектирование с применением цифровых методов активно ведётся 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.

Методика исследования

1. Сбор информации о традиционных и компьютерных методах формообразования современной архитектуры.
2. Обзор и анализ реализованных и нереализованных проектов с применением методов генеративного моделирования с целью выявления приемов, наиболее оптимальных для решения поставленной задачи.
3. Разработка методов и алгоритмов работы с генеративным моделированием в рамках архитектурного формообразования.
4. Разработка экспериментально-адаптивных моделей для иллюстрации каждого из выявленных методов генеративного формообразования.

Практическая ценность

Проведенное исследование представляет новый подход к формообразованию и решению архитектурных задач при автоматизации процесса проектирования на стадии поиска формы.

Теоретическая ценность

Данное исследование классифицирует и систематизирует основные направления цифрового моделирования. Важной теоретической ценностью исследования является классификация методов генеративного формообразования и алгоритмы их внедрения на различных этапах проектирования.

На защиту выносятся

- классификация основных методов параметрического и генеративного формообразования архитектурного проектирования;
- методы генеративного формообразования и проектно-экспериментальные модели, иллюстрирующие данный подход в архитектуре.

Апробация работы

Участие с первоначальными результатами исследования в конференции “Открытый город” 2017 года. Международная молодежная научная конференция «Прочность, ползучесть и разрушение строительных и машиностроительных материалов и конструкций». Москва, 2014 год. Международная научно-практическая конференция «Гуманитарные и общественные науки: опыт, проблемы и перспективы». Ставрополь, 2016 год, Материалы диссертации были опубликованы в сборниках тезисов и статей: Наука, образование и экспериментальное проектирование, МАРХИ, 2018- 2022 г.

Основные положения исследования были использованы при разработке программы для 5-го курса (бакалавр) дисциплины “Цифровые средства” в Российском Университете Дружбы Народов. Основные выводы исследования были внедрены в проектный процесс при выполнении курсовых студенческих работ.

Объем и структура диссертации. Диссертация представлена в одном томе и состоит из текстовой части (150 страниц) (рис.1), иллюстраций (133 страницы), списка использованной литературы (129 наименований). Текстовая часть состоит из введения, трех глав, заключения, включенных в текст иллюстраций и приложения. Структура диссертации представлена в приложении (рис. 1).

СОДЕРЖАНИЕ И ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследования, приводятся этапы эволюции проектирования параметрической и генеративной архитектуры с применением алгоритмизации процесса поиска формы. Выявляются цель, задачи и методы исследования, обозначаются объект, предмет и границы исследования, определяется актуальность, научная новизна и теоретическая значимость работы.

ГЛАВА I ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АРХИТЕКТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ МЕТОДОВ

В первой главе даются общие сведения, определяющие понятия параметрических и генеративных методов в общем контексте и в контексте архитектуры. Рассматривается растущая роль автоматизации рабочего процесса в современном архитектурном проектировании. В результате исследования выявлены различные варианты работы с параметрическими инструментами (рис. 5), которые могут влиять на формообразование как на этапе поиска формы, так и на этапе производства архитектурного макета.

1.1. Терминологический ряд основных направлений цифровых методов

Разработано подробное пояснение основных терминов, имеющих непосредственное отношение к цифровому производству архитектурных прототипов: параметрическое проектирование, алгоритмическое проектирование, генеративное моделирование, генетические алгоритмы⁷, топологические оптимизации⁸, компьютерные симуляции⁹, агентные системы, биомиметика, искусственный интеллект, компьютерное зрение¹⁰, база данных (BIG DATA), интернет вещей¹¹, цифровое производство.

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 путём обработки и анализа данных (big data).

Также автор подчеркивает важность термина «генеративная архитектура», который является результатом начальной фазы искусственного интеллекта, когда основной контроль и вектор задаёт сам человек (архитектор). Однако существуют

⁷ Алгоритмы, работа которых основана на эволюционных принципах естественного отбора. - Ueda, T. Discovering Building Blocks for Human Based Genetic Algorithms. / T. Ueda // Illinois Genetic Algorithms Laboratory. -2008.-Report № 2007020

⁸ Процесс оптимизации геометрической формы, которых заключается в удалении лишнего материала, на основе конструктивного расчёта. - Frazer, J. An Evolutionary Architecture now. / J. Frazer // London: Architectural Association. - 1995. - P. 36-45.

⁹ Симуляции над геометрическими телами по средствам законов физики (гравитация, скручивание и т.д.). - Goldstein, R. Schedule - Calibrated Occupant Behavior Simulation / R. Goldstein // Proceedings of SimAUD. - 2010. - P. 3-10.

¹⁰ Направление в области искусственного интеллекта, которое включает алгоритмы для обнаружения, отслеживания и классификации объектов по их изображениям. - 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.

¹¹ Возможность подключать к интернету любые электронные устройства. - Шайю С. Обзор архитектурного искусственного интеллекта // Гарвардская высшая школа дизайна. - 2019.

этапы архитектурного проектирования, где помимо утилитарных задач, генеративное моделирование помогает создавать определённые варианты решений на основе вводных данных, но в конечном итоге финальный выбор результата зависит от человека и его художественного восприятия.

1.2. Основные исторические этапы развития цифровых методов

1) Первый этап. Прототипами генеративной архитектуры являются античные амфитеатры, так как форма такого объекта полностью отвечает эксплуатационным задачам.

2) Второй этап развития цифровых методов можно связать с творческим подходом поиска формы А. Гауди, который заключался в экспериментах с симуляциями.

3) Третий этап развития цифровых методов можно связать с творческим подходом поиска формы Ф. Отто, основанным на материалах и их свойствах.

4) Четвертый этап развития цифровых методов можно отнести к экспериментальным поискам С. Прайса, которые заключаются в понимании архитектурного проекта как связи организованной и систематизированной информации, где пользователи играют важную роль.

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

Проведен аналитический обзор работ знаменитых архитектурных бюро, применяющих методы параметрического и генеративного проектирования в своей практике, исследован опыт предшествующих теорий формообразования (рис.2). Также рассмотрена работа Патрика Шумахера и его “Манифест Параметризма”¹², в котором говорится о том, что параметризм¹³ – это ответ архитектуры на компьютерное сетевое общество, представляющий собой парадигматический сдвиг в архитектуре после модернизма, новый стиль продолжающий развиваться во все более сложной и гибкой сети глобальных коммуникаций. П. Шумахер доказывает, что параметризм развивается с помощью продвинутых вычислительных технологий проектирования и производства. Теоретические доводы П. Шумахера (глава бюро Zaha Hadid Architects) об основных положениях параметризма заключаются в описании характерных свойств и философии цифрового направления современной архитектуры.

Проанализировано влияние параметрических и генеративных методов проектирования, которые заключается в разработке индивидуальных алгоритмов¹⁴, основанных на исходных данных участка проектирования и технического задания.

¹² Шумахер П. Параметризм – Новый Глобальный Стиль для Архитектуры и Городского Дизайна // П. Шумахер, // – Лондон AD Architectural Design – Digital Cities. – 2009.- Вып. 79. – No 4, июль/август- – С. 24-39.

¹³ 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 с.

¹⁴Волынский В.Э. Информационно-технологические методы проектирования в архитектурном формообразовании / Дисс. на соиск. учен. степ. кандидата архитектуры. – Москва. 2012. – 202 с.

Рассмотрено влияние естественных и математических наук на параметрические методы моделирования, так как учения о природе и математике помогают архитекторам понять принципы работы с пространством и формой. На основании того, что формообразование в контексте биологии является частью жизнедеятельности организма и особенностью его строения, математика используется как техника анализа и способа производства геометрических схем, основанных на теории множеств и планирования. Таким образом, идея современного архитектурного формообразования представляет собой междисциплинарный подход¹⁵.

Выводы по главе I

В заключении первой главы рассмотрены зарубежные и отечественные технологии применения параметрических и генеративных методов поиска архитектурной формы. Анализ мирового опыта проектирования современных зданий показал, что применение параметрических методов возможно в различном диапазоне: не только для фасадных решений, но и для создания пространственного решения. Анализ конкретных примеров позволил сформулировать выводы по классификации параметрических и генеративных методов.

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

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

3. Анализ показал, что некоторые сложные 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 архитектурного моделирования (оптимизация и создание нового).

5. Определены актуальные направления современной цифровой архитектурной теории и практики, связанные с применением искусственного интеллекта¹⁶ – машинное обучение и компьютерное зрение.

ГЛАВА II АНАЛИЗ ФОРМИРОВАНИЯ АРХИТЕКТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ

¹⁵ Hensel M., Menges A., Weinstock M. Computational Morphogenesis, Emergent technologies and design, 2009, стр. 51-52.

¹⁶ Указ Президента РФ от 10 октября 2019 года №490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/44731> (дата обращения: 14.11.2020).

НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ МЕТОДОВ И ТЕНДЕНЦИЯ ИХ РАЗВИТИЯ В XXI ВЕКЕ

Во второй главе рассматриваются методы параметрического и генеративного проектирования архитектуры. Опираясь на исследования мирового и отечественного опыта алгоритмического проектирования и поиска формы, можно выделить некоторые методы генеративных инструментов архитектурного моделирования: компьютерные симуляции физических процессов, агентные системы, топологические оптимизации, генетические алгоритмы.

2.1. Современные факторы и предпосылки развития цифровых методов в архитектуре

Основными факторами развития цифровых методов поиска архитектурной формы являются:

- 1) современное общество как социально-экономическая культурная составляющая, основанная на использовании цифровых технологий во всех сферах жизни;
- 2) развитие автоматизации и современных технологий во всех сферах деятельности человека;
- 3) образование новых философских течений¹⁷, основанных на объектно-ориентированной онтологии, существование объекта вне зависимости от того, как его воспринимает субъект;
- 4) потребность в создании новых архитектурных типологий зданий, продиктованная развитием жизненных процессов в современном обществе;
- 5) формирование бионической эстетики в архитектуре.

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

Для понимания потенциала современных инструментов архитектурного формообразования необходимо осознать картину мира и потребности современного общества. Следует отметить основные проблемы несоответствия социальных требований общества и антропогенной среды:

1. Численность населения крупных городов постоянно растёт, а количество жилья и его габариты не предназначены для таких изменений.
2. Потребности человека меняются, в связи с чем встает вопрос создания архитектурных гибридных и многофункциональных пространств.

Современную архитектуру следует рассматривать в контексте объектно-ориентированной онтологии, когда существует два вида восприятия: объектный и чувственный. Следовательно, архитектура помимо выполнения основных функций

¹⁷ 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.

(польза, прочность, красота), должна ещё быть перформативной, то есть постоянно адаптироваться под нужды обитателей.

Перформативность и адаптивность архитектуры¹⁸ относятся ко всем фазам и стадиям проектирования. Этап поиска архитектурной формы превращается в постоянное изменение вариантов, подбор наилучшего и самого оптимального варианта происходит за счёт 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, таким образом стоит отметить междисциплинарность данного исследования.

Рассматривая современную картину мира, необходимо отметить постоянное усложнение жизненных процессов благодаря научно-техническому прогрессу. Однако важной задачей современного общества является сохранение природных ресурсов. Проецируя философию генеративного метода проектирования на современную картину мира, можно провести параллель, которая основана на законе сохранения энергии и минимизации природных ресурсов в результате математического просчета наиболее оптимальных вариантов архитектурных форм.

2.3. Направления развития и классификация цифровых методов архитектурного формообразования

Выделено два основных направления цифровых методов архитектурного: параметрические и генеративные. Параметрические методы проектирования стимулируют на развитие и внедрение компьютерных инструментов для выполнения определённых задач, например для моделирования сложной формы, создание автоматизированной модели, с изменяемыми параметрами. То есть архитектор создаёт форму в соответствии со своими эстетическими представлениями, 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 уровне геометрического кода (точки, линии, поверхности, объёма). С другой стороны, существуют генеративные методы, которые помогают решать поставленные архитектурные задачи путём создания большого количества проектных вариантов. Таким образом, цифровая модель подчинена компьютерным генерациям, а архитектор контролирует правильность исходных данных (технического задания), непосредственную релевантность компьютерного кода и выбирает из множества предложенных компьютером вариантов наиболее оптимальный, в том числе с эстетической точки зрения.

Выводы по главе 2

Вторая глава посвящена анализу и классификации различных методов генеративного проектирования с учетом социальных предпосылок применения таких ин-

¹⁸Возможность любого объекта подстраиваться под условия окружающей среды. - 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

струментов. Исходя из проведенного анализа и оценки влияния генеративных методов архитектурного формообразования, сделаны следующие выводы:

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

2. Выявлены основные направления параметрических методов архитектурного формообразования: алгоритмическое моделирование на основе аттракторных систем и математических формул.

3. 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.

4. Разработана классификация применения инструментов генеративных методов на различных стадиях проектирования (концепция, проектная и рабочая документация)

- на стадии концепции архитекторы используют широкий спектр различных инструментов генеративного проектирования для предпроектного анализа и поиска формы;

- на стадиях проектной и рабочей документации весь спектр генеративных методов сужается до инструментов, которые способствуют оптимизации цифровой модели, и помогают с выпуском чертежей, сократив рутинные процессы.

ГЛАВА III

МЕТОДЫ ГЕНЕРАТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОЕКТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ

Рассматриваются четыре основных метода генеративного моделирования: 1. Генетические (эволюционные) алгоритмы. 2. Топологические оптимизации. 3. Агентные системы. 4. Компьютерные симуляции.

3.1. Метод генетических (эволюционных) алгоритмов генеративного моделирования

3.1.1. 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.

3.1.2. Одним из самых главных инструментов данного метода в среде программы Grasshopper (встроенный компонент визуального программирования для Rhinoceros) являются плагины Galapagos и Octopus.

Алгоритм процесса работы генетического метода поиска формы заключается в такой последовательности:

- 1) Первый этап характеризуется моделированием случайного набора решений.
- 2) Пригодность – это оценка каждого решения с точки зрения вводных параметров.
- 3) Формирование новой популяции характеризуется поиском решений на основе необходимых параметров.
- 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 на решение в рамках поставленной проблемы.
- 10) Повторение или остановка процедуры формирования решений проблемы.

3.1.3. Ярким примером внедрения генеративных методов в архитектурном формообразовании можно назвать проект Многофункционального жилого здания в штате Небраска, архитектора-исследователя Nate Holland. 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 анализирует различные варианты, выбирает наилучшие комбинации, формируя пятна застройки, которые подходят заданным требованиям. Затем архитектор приступает к оптимизации верхних этажей, выстраивая визуальные линии от пола этажа до береговой линии.

Стоит отметить, что эволюционные алгоритмы часто применяются в связке с другими инструментами генеративных алгоритмов, например дополнение Ladybug (к Grasshopper), которое дает данные по климату и основным пространственным особенностям места проектирования. Следовательно, эволюционный алгоритм (инструмента Galapagos) совместно с алгоритмом Ladybug дает возможность подобрать самую оптимальную форму здания, исходя из параметров инсоляции и других особенностей местности.

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 этого метода служили климатические показатели региона и видовые характеристики.

3.2. Метод топологических оптимизаций генеративного моделирования

3.2.1. Топологические оптимизации – это последовательный вычислительный процесс моделирования, работающий в ограниченном прерывистом пространстве. Метод алгоритма может уточнить распределение заданных нагрузок и опор, для того чтобы достигнуть максимальной производительности конструкции или архи-

тектурного элемента. Основная цель использования методов топологических оптимизаций заключается в том, чтобы произвести структурную оптимизацию геометрии, основываясь на исходных параметрах, опор, материала, нагрузок и других факторах.

3.2.2. Самым популярным инструментом топологических оптимизаций можно назвать компонент Millipede для программы Rhinoceros, в среде визуального языка программирования Grasshopper.

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 в Grasshopper, с подключением необходимых алгоритмов программы Millipede.
- 4) Формирование результата топологической оптимизации, где белые участки – это необходимая для работы элемента геометрия, а черные участки – 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).

3.2.3. Ярким примером внедрения метода топологических оптимизаций является проект навеса на трех опорах, который был разработан исследователями департамента Цифровых технологий, Федерального Института Технологий в Цюрихе. 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 3-х опорных элементов.

Площадь объема плиты была разделена на определенное количество участков, которые впоследствии сформировали растровое изображение в оттенках серого, что привело к пониманию распределения 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. Такая модель иллюстрирует процесс того, 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.

3.3. Метод агентных систем генеративного моделирования

3.3.1. Метод агентных систем представляет собой действия, которые формируются определенными взаимодействующими интеллектуальными единицами. 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.

3.3.2. 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.

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

3) Следующий шаг – это 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 удовлетворения основным законам алгоритма).

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

3.3.3. 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, для того чтобы улучшить структуру формы по отношению к сжимающимся стержням фермы.

Метод агентных систем опробован на проектно-экспериментальной модели № 3 общественного центра. Такая модель иллюстрирует процесс того, 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).

3.4. Метод компьютерных симуляций генеративного моделирования

3.4.1. 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.).

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

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, которая включает в себя детали и основные параметры – сила ветровой нагрузки, вес исходного элемента, гравитации, материал и время действия симуляции.
- 3) Запуск процедуры симуляции.
- 4) Повторный запуск или остановка процесса симуляции.

3.4.3. Самым ярким архитектурным проектом, где были внедрены симуляции, является собор Саграда Фамилия архитектора А. Гауди, который использовал вышеупомянутый принцип задолго до появления компьютерного моделирования. Антонио Гауди подвешивал грузики на нити, тем самым образовался купол собора, форма которого является наиболее оптимальной геометрией с точки зрения своих конструктивных качеств.

Метод симуляций опробован на проектно-экспериментальной модели № 4 общественного центра. Такая модель иллюстрирует процесс того, 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, определяя характер влияния на форму (скручивание, прямое действие).

Основные выводы по третьей главе

1. Выполнены классификации основных методов генеративного моделирования: 1. Генетические (эволюционные) алгоритмы. 2. Топологические оптимизации. 3. Агентные системы. 4. Компьютерные симуляции.
2. Разработаны схемы и модели, иллюстрирующие прикладные возможности генеративных методов поиска формы.
3. Генеративные и параметрические методы поиска архитектурной формы выдают различные варианты, которые архитектор должен сопоставить с техническим заданием, после чего можно принимать решение о выборе определённого варианта.
4. Разработана таблица результатов эксперимента формообразования, которая показала различные возможности оптимизации в зависимости от приложенной нагрузки, опор, материала и геометрии формы.
5. Проанализирован метод топологических оптимизаций с точки зрения влияния на форму зданий: ангаров, общественных центров, высотного строительства.

6. Выявлена практическая значимость инструментов генеративного и параметрического проектирования на примере экспериментальных проектов и моделей.

ВЫВОДЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

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

1) Выявлено влияние применения основных методов цифрового проектирования на этапе поиска формы зарубежной и отечественной архитектуре. Параметрическое и генеративное проектирование базируется 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 отвергает любые четкие разграничения функционального зонирования, следовательно, помещения перетекают друг в друга, трансформируясь. На основе собранных данных определены решения об ограничениях и условиях процесса поиска параметрической и генеративной формы. Сбор данных состоял из анализа социологических факторов рассматриваемого города, градостроительной ситуации, физико-географических особенностей местности, информации по историческому контексту.

2) 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, модели конструктивные оптимизации или улучшение акустических характеристик).

Генеративное проектирование в архитектуре – это результат применения искусственного интеллекта, но лишь на начальной стадии, когда основной контроль и вектор задаёт человек (архитектор).

Искусственный интеллект формирует свой собственный графический язык, основанный на компьютерных кодах и математике, который визуально может отличаться от человеческого в силу неестественной формы и компьютерного воплощения. Выявлено, что искусственный интеллект может быть multifunctional инструментом и помощником архитектора на различных стадиях архитектурного проектирования, сокращая время, потраченное на рутинные работы. В свою очередь архитектор способен контролировать и управлять методами искусственного интеллекта. Кроме того, на финальной стадии выбора образа здания архитектор

будет руководствоваться своим опытом, знаниями и умениями, которыми должен обладать зодчий.

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, поведение конструкций, материала;
- агентные системы – поиск формы на основе имитации процесса поведения определенного природного организма.

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

- поиск наиболее правильного решения архитектурной формы, исходя из поставленных задач технического задания;
- оптимизация используемого материала и конструктивной схемы цифровой модели;
- устойчивость экспериментальной цифровой модели к динамическим и статическим нагрузкам;
- поиск архитектурной 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 реко-

мендаций по цифровому формообразованию с целью получения новых композиционных приемов и методов. Автором намечена подготовка учебного пособия с целью отработки системного подхода к поиску новых творческих методов в рамках цифрового формообразования.

ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Работы, опубликованные в рецензируемых научных изданиях,
рекомендованных ВАК при Минобрнауки России:*

- 1) Салех М.С. «Применение современных методов автоматизированного проектирования для формообразования и расчета сооружений прогрессивной архитектуры» // Статья «Применение современных методов автоматизированного проектирования для формообразования и расчета сооружений прогрессивной архитектуры». Журнал «Строительная механика инженерных конструкций и сооружений». № 6 декабрь. Москва. 2016.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” Журнал Архитектура и строительство России ВХУТЕМАС – 100 №3 (235) 2020 ISSN 02357259 стр. 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

Публикации в других изданиях:

- 5) 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 г.
- 6) 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 г, ISBN 978-5-905519-03-1, Логос.
- 7) Салех М.С., Рынковская М.И. «Application of lattice shells when shaping progressive architecture» // Сборник статей «Mongeometrija». Сербия, Белград, 23-26 июня 2016 г.
- 8) 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

- 9) 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 – 2018г. Сборник тезисов. – М.: МАРХИ, 2018. – С.314.
- 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 - 2018г. Сборник статей. – М.: МАРХИ, 2018. – С.120-126
- 11) 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
- 12) 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 – 2019г. Сборник тезисов. – М.: МАРХИ, 2019.
- 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 – 2019г. Сборник статей. – М.: МАРХИ, 2019.
- 14) Салех М.С. «Архитектурное проектирование сетчатых оболочек: оптимизация и поиск формы» // РЕАБИЛИТАЦИЯ ЖИЛОГО ПРОСТРАНСТВА ГОРОДА ЖАНИНА Материалы XVI Международной научно-практической конференции им. В. Татлина. – Пенза, 2020.
- 15) 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 – 2020г. Сборник тезисов. – М.: МАРХИ, 2020.
- 16) 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 г. Сборник статей. – М.: МАРХИ, 2020.

- 17) Салех М.С. «Проблемы применения методов цифрового и физического формообразования в архитектурном проектировании» // Архитектура и архитектурное наследие. – Тезисы межвузовской научной конференции (планируемая дата публикации – май 2021 г.)
- 18) 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 – 2021г. Сборник тезисов. – М.: МАРХИ, 2021.

АСПИРАНТУРА МАРХИ 2022

СТРУКТУРА ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

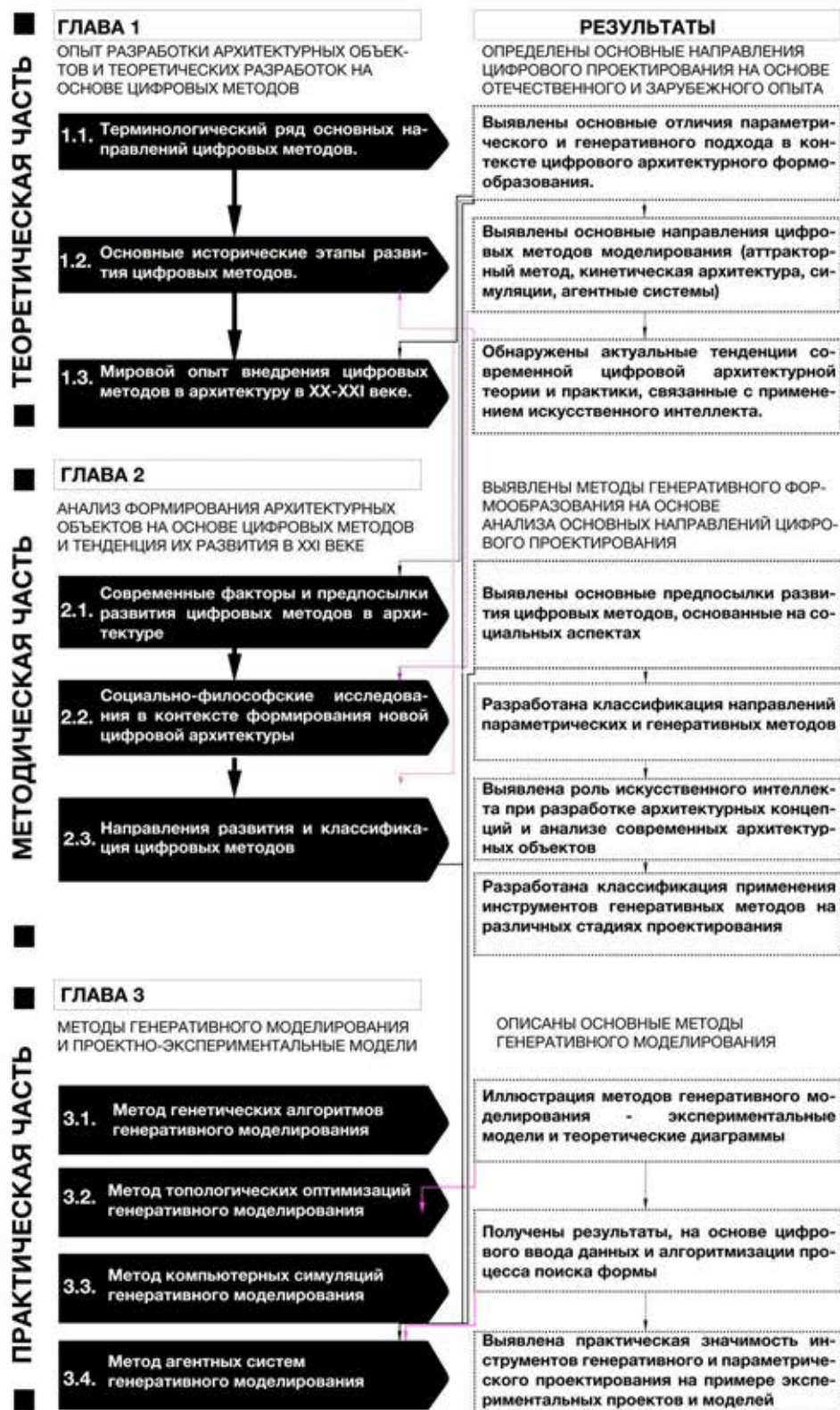


Рис. 1. Структура диссертационного исследования

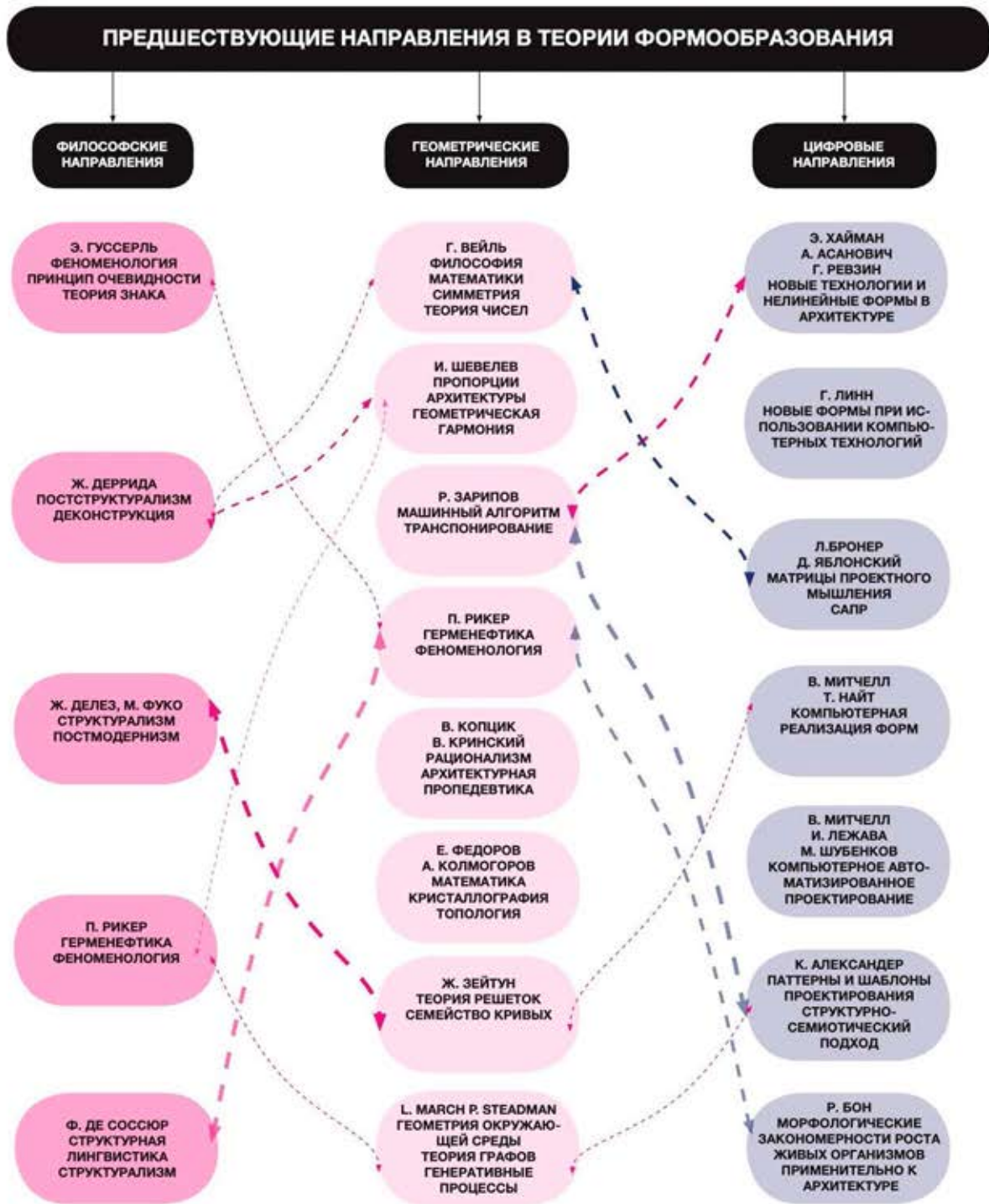


Рис. 2. Предшествующие направления и теории формообразования

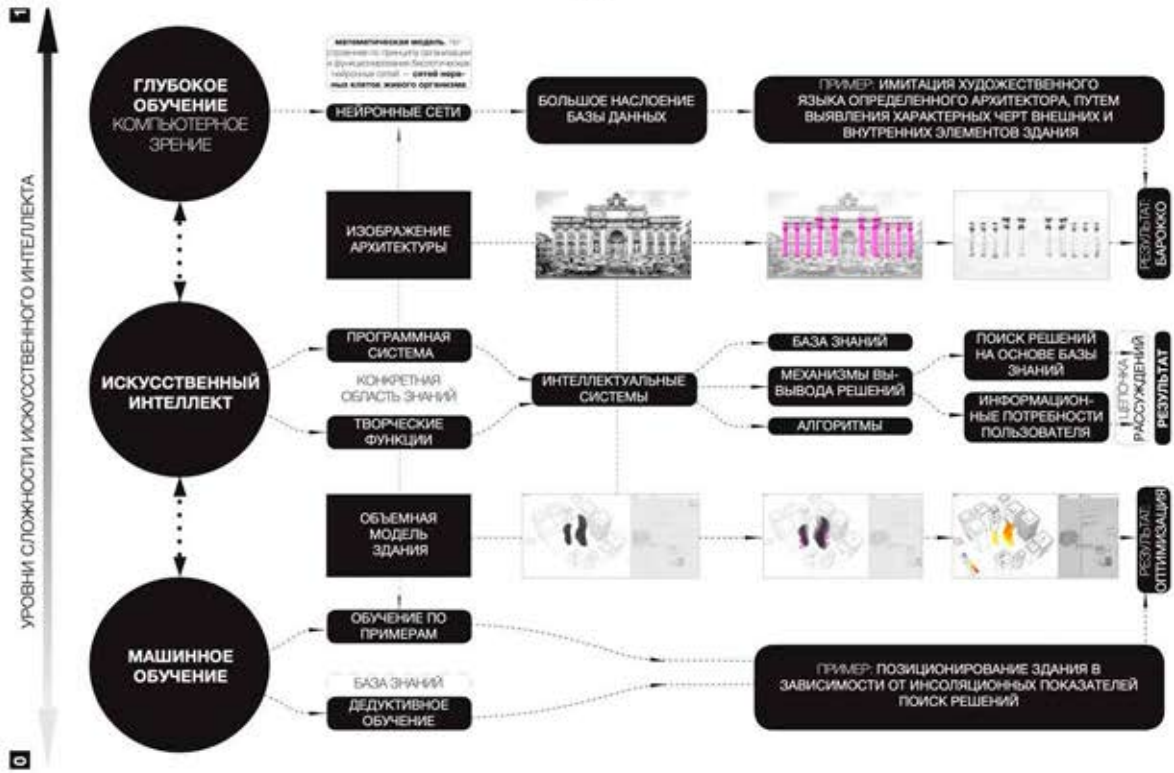


Рис. 3. Схема уровней сложности искусственного интеллекта

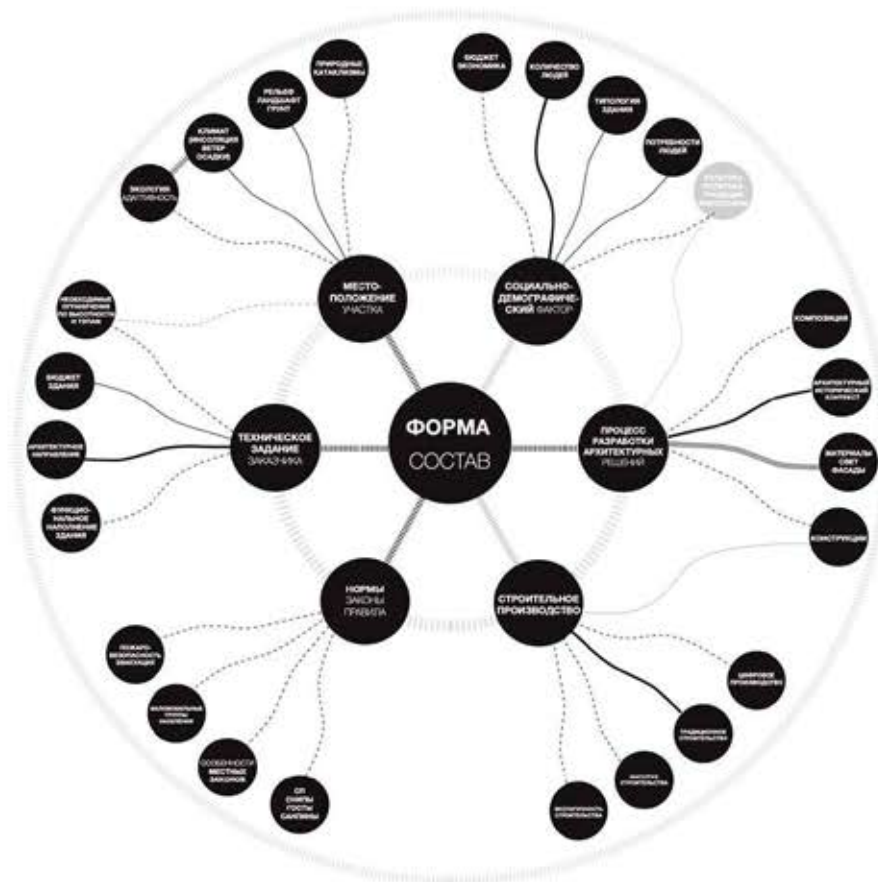


Рис. 4. Схема факторов, влияющих на процесс проектирования

