

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АРХИТЕКТУРЫ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

В настоящее время использование нейронных сетей в различных областях науки и техники становится все более распространенным и значимым. Одной из таких областей является проектирование архитектуры зданий и сооружений. С появлением новейших методов машинного и глубокого обучения, нейронные сети приобретают все большее значение в процессе создания инновационных и функциональных архитектурных решений.

Этот подход открывает новые перспективы для архитекторов, дизайнеров и инженеров, позволяя им создавать эффективные и уникальные проекты, которые отвечают современным требованиям и вызовам. Современные методы использования нейронных сетей в проектировании архитектуры зданий и сооружений включают в себя анализ больших объемов данных для выявления оптимальных решений, создание автономных систем управления, прогнозирование энергопотребления и многое другое.

Рассматриваются современные подходы и тенденции использования нейронных сетей в проектировании архитектуры зданий и сооружений, а также обсудить их потенциал для преобразования данной отрасли. Проанализированы примеры успешного применения нейронных сетей в архитектурной практике и выявлены возможности для дальнейших исследований и разработок в этой области.

Гипотезой исследования является утверждение, что применение современных методов нейронных сетей в проектировании архитектуры зданий и сооружений способствует созданию более эффективных, инновационных и устойчивых решений, удовлетворяющих современным требованиям устойчивого развития и комфортной жизни.

Целью является изучение современных методов использования нейронных сетей в процессе проектирования архитектурных объектов, рассмотрение их потенциала для создания инновационных, устойчивых и функциональных решений, а также выявление перспектив применения данного подхода в проектировании зданий и сооружений. В основу исследования был положен анализ примеров успешного применения конкретных случаев использования нейронных сетей в проектировании зданий и сооружений, для выявления преимуществ и результативности данного подхода.

Ключевые слова: нейронные сети, архитектура зданий и сооружений, энергетическая эффективность, инновации в архитектуре, ускорение способов проектирования, планировка жилых и общественных зданий.

USING NEURAL NETWORKS MODERN WAYS FOR DESIGNING ARCHITECTURE OF BUILDINGS AND STRUCTURES

Currently, the use of neural networks in various science and technology fields is becoming more widespread and significant. One such area is the buildings and structures architecture design. With the advent of the latest machine learning and deep learning techniques, neural networks are becoming increasingly important in the creating innovative and functional architectural solutions.

This approach opens up new perspectives for architects, designers and engineers, allowing them to create effective and unique designs that meet modern requirements and challenges. Modern methods of using neural networks in the buildings and structures architecture design include analyzing large volumes of data to identify optimal solutions, creating autonomous control systems, forecasting energy consumption and much more.

This article proposes to consider modern approaches and trends in the use of neural networks in the buildings and structures architecture design, and also discuss their potential for transforming this industry. We also propose to analyze examples of neural networks successful use in architectural practice and identify opportunities for further research and development in this area.

The hypothesis of the study is the statement that the use of modern neural network methods in the buildings and structures architecture design contributes to the creation of more efficient, innovative and sustainable solutions that meet modern requirements for sustainable development and comfortable life.

The purpose of this article is to study modern methods of using neural networks in architectural objects design, consider their potential for creating innovative, sustainable and functional solutions, as well as identify prospects for using this approach in buildings and structures design. The study was based on successful application analysis examples of specific cases of using neural networks in the buildings and structures architecture design to identify the advantages and effectiveness of this approach.

Keywords: *neural networks, architecture buildings and structures architecture, energy efficiency, innovation in architecture, design methods acceleration, residential and public buildings planning.*

Концептуальное архитектурное проектирование — это сложный процесс, который опирается на прошлый опыт и творческий подход в создании новых проектов. Применение искусственного интеллекта в этом процессе не должно быть ориентировано на поиск решения в определенном пространстве поиска, поскольку требования к проектированию на концептуальной стадии определены еще не четко. Вместо этого, процесс следует рассматривать как исследование требований, а также возможных решений для удовлетворения этих требований.

Как указали Л. Сонг, Ж. Габусси и Д. Квон архитектура отличается от других искусств тем, что ее продукты должны быть одновременно эстетически приятными, структурно стабильными и функциональными [1]. Определение формы здания является основным

этапом процесса архитектурного проектирования. Архитекторы обычно начинают проект с бесплотной концепции и расплывчатого представления о ее форме, которые составляют основу для предложения широкого набора решений. Первоначальная форма будет влиять как на производительность, так и на стоимость строительства, использование дневного света, энергопотребление, конфигурацию планировки, теневые характеристики, акустику, функциональную доступность и усиление солнечной энергии, а также другие характеристики [2]. В этом контексте поиск форм становится одним из ключевых стадий концептуального проектирования, поскольку его результаты являются исходными данными для следующих этапов процесса проектирования, строительства и на протяжении всего жизненного цикла здания.

Нейросети в проектировании зданий используются в различных областях, таких как архитектурное проектирование, инженерные расчеты, энергоэффективность и даже создание автономных систем управления зданиями. Некоторые из способов, в которых нейросети используются при проектировании, включают в себя следующие аспекты.

1. Архитектурное проектирование: нейросети могут использоваться для генерации архитектурных концепций, анализа формы зданий и разработки уникальных дизайнов. Они могут помочь архитекторам и дизайнерам в создании инновационных и функциональных решений для зданий.

2. Энергоэффективность: возможность применения нейросетей для оптимизации энергопотребления зданий. Они могут использоваться для прогнозирования энергетической эффективности здания, оптимизации систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, а также для управления энергосберегающими технологиями.

3. Инженерные расчеты: нейросети могут быть задействованы в расчетах механических, электрических и строительных характеристик зданий. В перспективе они помогут в анализе прочности материалов, прогнозировании структурных нагрузок, оптимизации конструкции зданий и расчете инженерных систем.

4. Автономное управление зданиями: нейросети могут использоваться для разработки автономных систем управления зданиями, таких как системы умного дома. Они могут помочь в оптимизации систем безопасности, управлении освещением, климатическими системами и другими аспектами управления зданиями.

5. Прогнозирование спроса: использование нейронных сетей для анализа тенденций спроса на различные типы зданий и сооружений, создание прогнозов для развития инфраструктуры и городского планирования.

Решения относительно формы здания влияют на его архитектурные, эстетические и структурные особенности, а также на его устойчивость. Форма влияет на яркость и теплотери, а также на стоимость и полезную площадь, и это лишь несколько примеров. В этой области архитектуры ведется активная работа по изучению того, как создавать сложные формы подходящим способом для настройки и оптимизации этих параметров. Подробный обзор методов вычислительной оптимизации, применяемых для проектирования устойчивого строительства, можно найти в обзоре М. Эванса за 2013 г. [3]. Этот

обзор начался как исследование современного состояния искусственного интеллекта, применяемого в архитектуре. Особенно интересны творческие возможности систем искусственного интеллекта, их использование в художественных областях дизайна и создание изображений, имеющих эстетическую ценность для человека.

Клеточные автоматы (КА) — это математическая модель динамической системы, состоящей из набора ячеек, которые приобретают разные состояния или значения. Эти состояния изменяются в дискретные единицы времени, то есть их можно количественно оценить через регулярные промежутки времени с помощью целочисленных значений. Таким образом, набор ячеек достигает эволюции на основе определенного математического выражения, известного как правило локального преобразования, которое чувствительно к состояниям соседних ячеек [4]. Одним из преимуществ КА является его способность достигать ряда свойств, которые возникают из локальной динамики во времени, а не с самого начала. Эти свойства применяются ко всей системе. Поэтому анализировать глобальные свойства КА с самого начала непросто, кроме как с помощью моделирования, начиная с начального состояния или конфигурации ячеек и изменяя в каждый момент состояния всех из них синхронным образом. В области архитектурного проектирования КА способны генерировать шаблоны или модели, которые сложно предугадать, и предлагать архитектурные формы. Во многих случаях самое важное — это процесс: использование данных, сгенерированных центром сертификации, поиск шаблона, который будет нам полезен, и знание того, как интерпретировать и изменять результаты для использования в архитектуре. Целью являются не сами результаты, а то, что можно узнать и какой сделать вывод из процесса генерации. Шаблоны, генерируемые системами КА, ценятся в архитектурном дизайне за их пространственные качества, а также за часто неожиданный характер их результатов, которые позволяют дизайнерам расширить сферу своего воображения [5, 6].

М. Герр и С. Форд предложили тематическое исследование, связанное с проектированием гостиничного комплекса для инженеров и ученых, работающих на Европейском чрезвычайно большом телескопе (E-ELT), расположенном в пустыне Атакама в Чили [7]. Р. Форд ответил первоначальным методологическим предложением по созданию машины КА, которая бы принимала соответствующие

с точки зрения архитектуры правила. Эти правила будут генерировать формы, которые затем могут быть подвергнуты детальному архитектурному изучению и вмешательству (рис. 1). Роль дизайнера была определена как совместная роль по сотрудничеству и оценке наряду с системой КА.

Р. Форд стремился сосредоточить по-

тенциал КА, который не предопределен и не контролируется целями архитекторов, и подчеркнул, что возможность достижения результатов, выходящих за рамки целей и намерений архитекторов, позволяет расширить воображение, что поможет развитию инновационные решения.

Так же одним из первых Р. Пасос исполь-

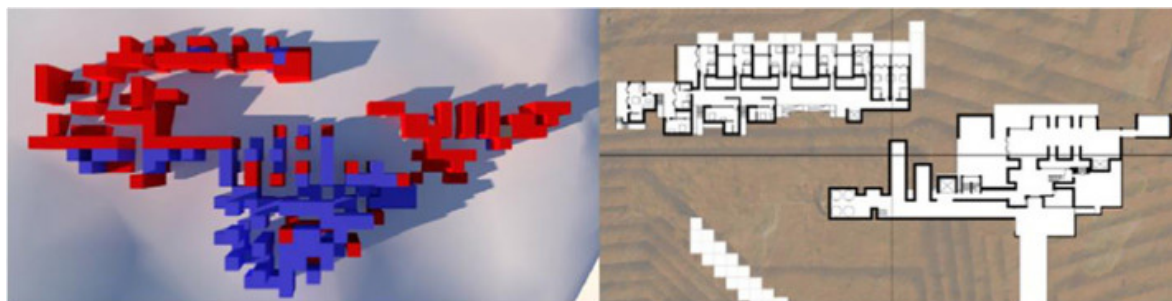


Рис. 1. Генерация и интерпретация архитектурных результатов в процессе диалогового генеративного проектирования. Сгенерированная модель – слева, интерпретируемые планировки – справа. М. Герр и Р. Форд, 2016 г.

зовал методы искусственного интеллекта для моделирования искусственных объектов посредством процесса морфогенеза, чтобы сделать их реалистичными, создавая сложность и разнообразие для достижения несовершенств, подобных тем, которые встречаются в природных объектах, и подвергал свою систему различным тестам 3D-моделирования сложной геометрии, в том числе проект фасада небоскреба (рис. 2) [8].

В 2014 г. Д. Джин и Д. Джонг предложили процесс оптимизации формы здания произвольной формы на основе GA, используя модель для прогнозирования тепловой нагрузки ограждающей конструкции как целевую

функцию [9]. По мнению авторов, изменение характеристик тепловой нагрузки, вызванное формой здания, можно быстро спрогнозировать и оптимизировать на начальном этапе проектирования с помощью программного обеспечения Rhino и Grasshopper. Они протестировали предложенный процесс, выведя оптимизированную форму модели конструкции для различных климатических зон (рис. 3), и пришли к выводу, что влияние оптимизации формы на основе GA на улучшение тепловых характеристик зданий свободной формы было больше в низких широтах. регионах, чем в высокоширотных регионах.

В 2014 г. турецкая компания Dincer пред-



Рис. 2. Дизайн башни, напоминающий башню Бикмана, созданный с помощью GA и визуализированный в Vray. Р. Пасос, 2017 г.

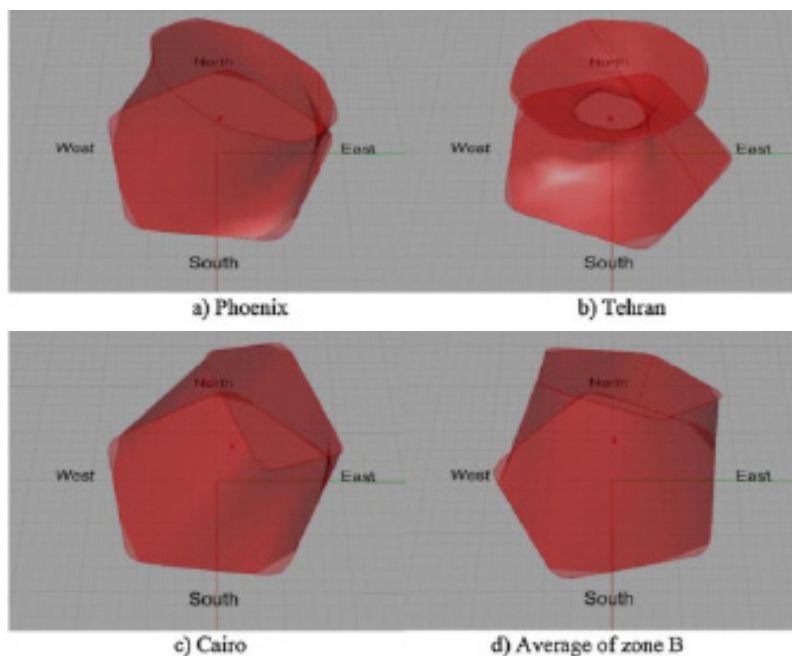


Рис. 3. Оптимальная форма для климатической зоны В (засушливая): а – Феникс, б – Тегеран, в – Каир, г – средняя зона В. Д. Джин, 2014 г.

ставила инструмент поддержки принятия решений, сочетающий в себе право выбора и стандартизацию при производстве проектов коллективного жилья с учетом предпочтений пользователей на ранних стадиях проектирования [10]. Система также включает протокол «Отражение в действии» и КА. Протокол предоставляет пользователю и/или проектировщику возможность участвовать в процессе, используя фрагментацию и обратную связь, а также направлен на снижение влияния КА как независимых и неконтролируемых отношений. Эта компьютерная

модель для поддержки принятия решений охватывает этапы планирования территории и фасада. Компания Dincer экспериментировала с реализацией в регионе Карабук-Енишехир в Турции, где образцы планов жилых кварталов были созданы с использованием различных параметров: направления ландшафта, высоты, определения строительной высоты для особых зон, определения площади, используемой для социализации и т. д. Ориентации размещения собирались после каждого поколения (рис. 4).

На втором этапе для планирования про-

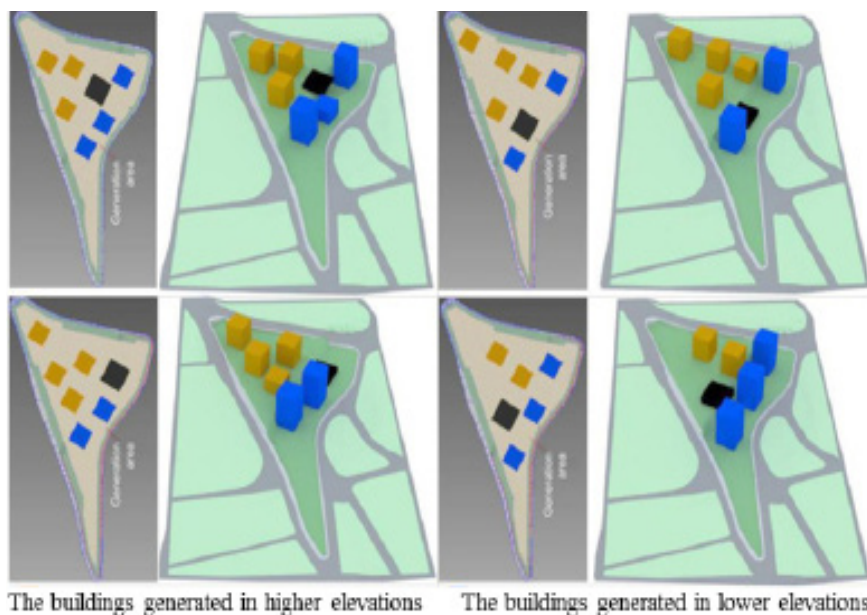


Рис. 4. Реализация плана участка Карабук-Енишехир. Компания Dincer, 2014 г.

странства был выбран один из жилых блоков, при этом для каждого этажа было создано несколько альтернатив с использованием небольших изменений параметров, таких как

начальное направление генерации и приоритизация типов жилья. Наконец, были созданы образцы ориентации фасадов (рис. 5).

С аналогичной целью в 2015 г. К. Араги и Р.

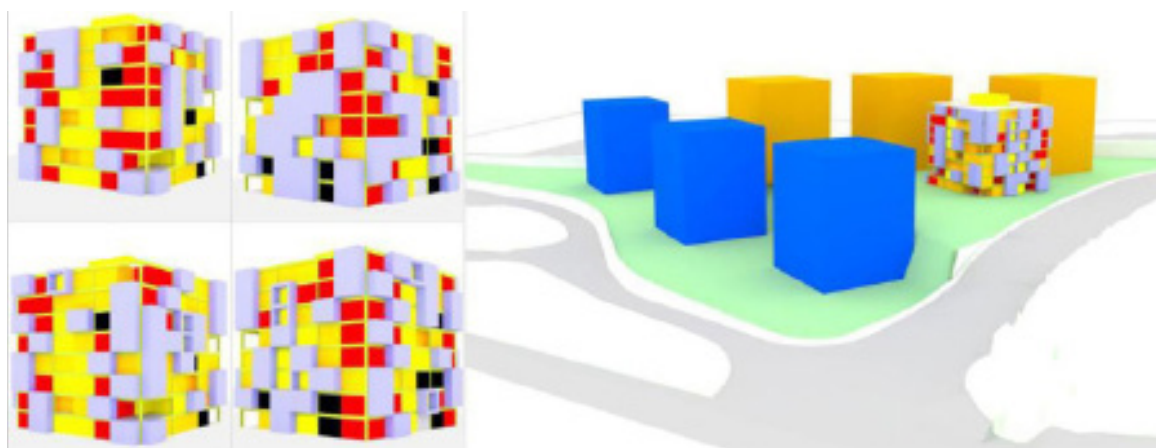


Рис. 5. Виды выбранного квартала. Планировочные решения – слева, ориентацией фасадов – справа. Компания Dincer, 2014 г.



Рис. 6. Пример интеграции СА в проектирование архитектуры застройки высокой плотности: жилой проект в Нидерландах. Вид с высоты птичьего полета – слева, перспектива – справа. К. Араги и Р. Стаффс, 2015 г.

Стоуффс представили исследование интеграции СА в процесс архитектурного проектирования, в частности, при проектировании форм жилых зданий с высокой плотностью застройки [11]. Они рассмотрели потребности в доступности и освещении при создании 3D-архитектурного проекта жилого проекта в Нидерландах (рис. 6). Механизм этого генеративного процесса состоит из двух этапов: во-первых, разработка визуальных описаний архитектурных требований и, во-вторых, расшифровка этих описаний на алгоритмический язык и правила СА.

При проектировании правила СА выполняют анализ и синтез одновременно. К. Конис, А. Гамас и К. Кенсек предложили систему пассивной оптимизации производительности (СПОП), которая может оптимизировать геометрию здания, ориентацию, configura-

цию ограждений и другие параметры здания в ответ на требования программы, прилегающие здания для конкретного участка, а также дневное освещение и климатические условия, показатели эффективности энергопотребления всего здания [12]. При этом он может улучшить характеристики дневного света, управление солнечным светом и стратегии дневной вентиляции на ранних этапах проектирования архитектурного проекта. Авторы проверили применимость рабочего процесса параметрического моделирования на основе моделирования, сравнив свои результаты с эталонной моделью ASHRAE 90.1 в четырех различных климатических и городских условиях (Лос-Анджелес, Хельсинки, Мехико и Нью-Йорк). Для тестирования они учитывали фактический городской контекст каждого участка (рис. 7). Они пришли

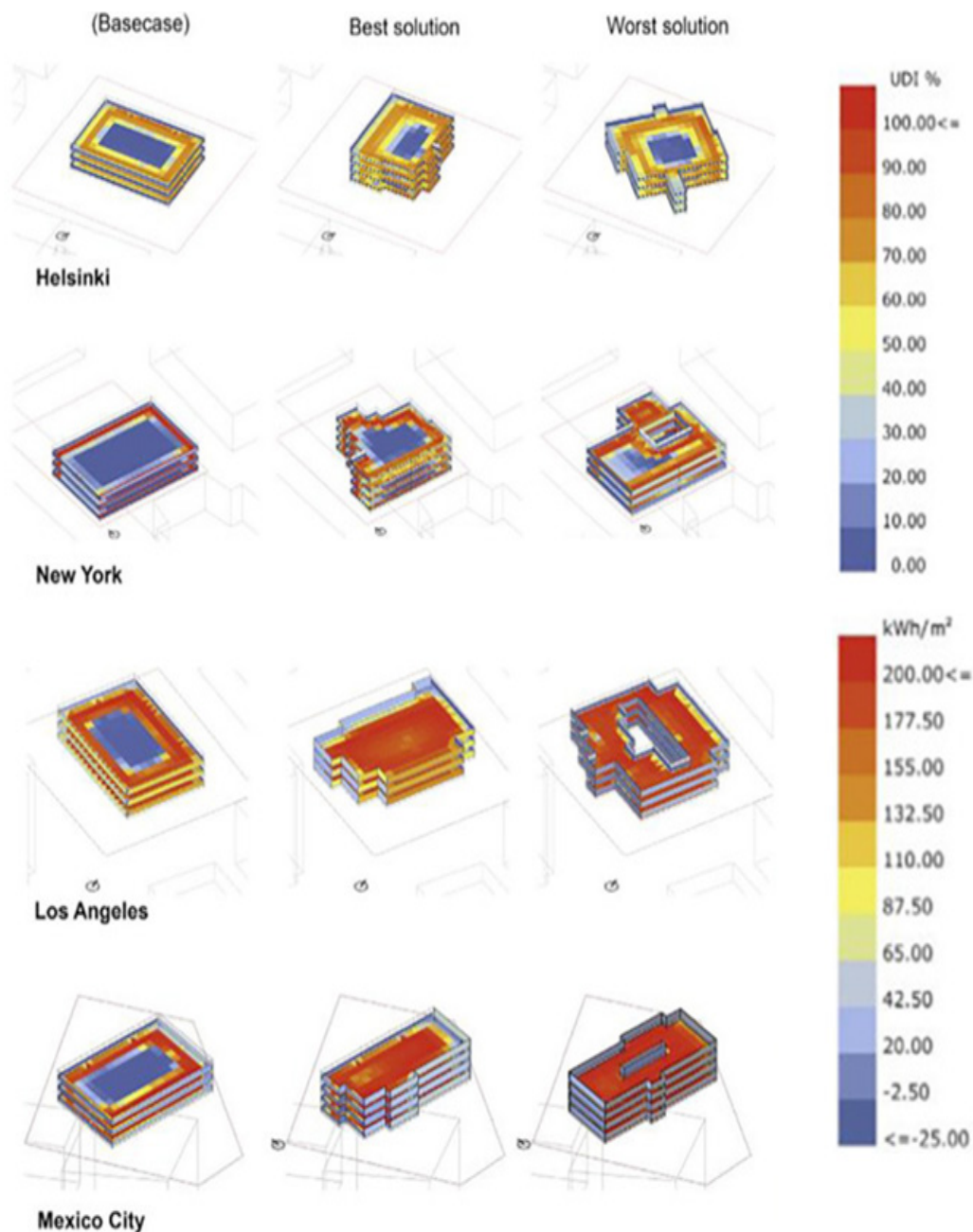


Рис. 7. Параметрические модели зданий, созданные с помощью СПОП, приводят к лучшим (центральный столбец) и худшим (правый столбец) результатам производительности для каждого из четырех климатических сценариев. Базовая модель для каждого сценария показана в левом столбце. К. Конис, 2016 г.

к выводу, что СПОП и рабочий процесс на основе моделирования помогают сделать генеративное моделирование более доступным для проектировщиков, работающих над обычными проектами и графиками для создания высокоэффективных зданий.

Комнаты создаются путем разделения исходного многоугольника на небольшие части, а операции разделения закодированы с использованием генетических алгоритмов; хотя речь идет о многоэтажных планировках, вертикальные пространства, такие как двухэтажные гостиные и лестницы, были

рассмотрены В. Мерреллом и др. [15,16]. Метод, предложенный Ц. Го и Б. Ли, сочетает в себе мультиагентную систему и прогрессивный процесс. Мультиагентная система моделирует макет в виде точек и линий, сокращает пространство поиска и позволяет оптимизировать 3D-проекты (рис. 8). Модель, которую использует эволюционная оптимизация, основана на трехмерной сеточной системе, которую легко реализовать, но она ограничивает пространство для решения. Неортогональные конструкции внутри сеточной системы сложно создать, и в этой модели

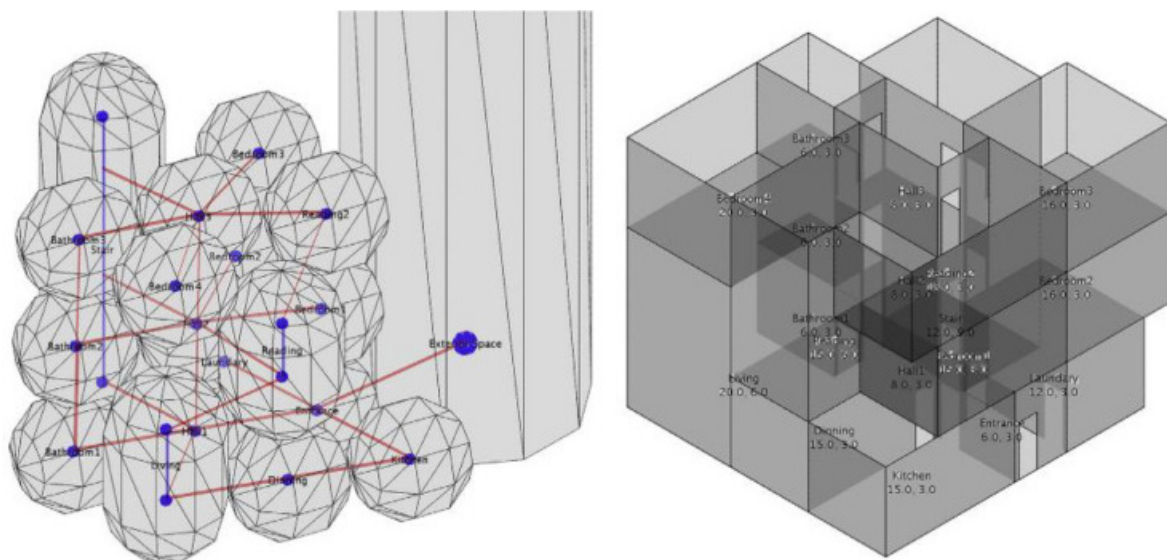


Рис. 8. Сгенерированные топологические связи трехуровневых домов, синие точки и линии показывают внутреннюю геометрию пузырьков, а красные линии представляют связи между пузырьками – слева. Оптимизированный макет на основе сетки – справа. Ц. Го и Б. Ли, 2017 г.

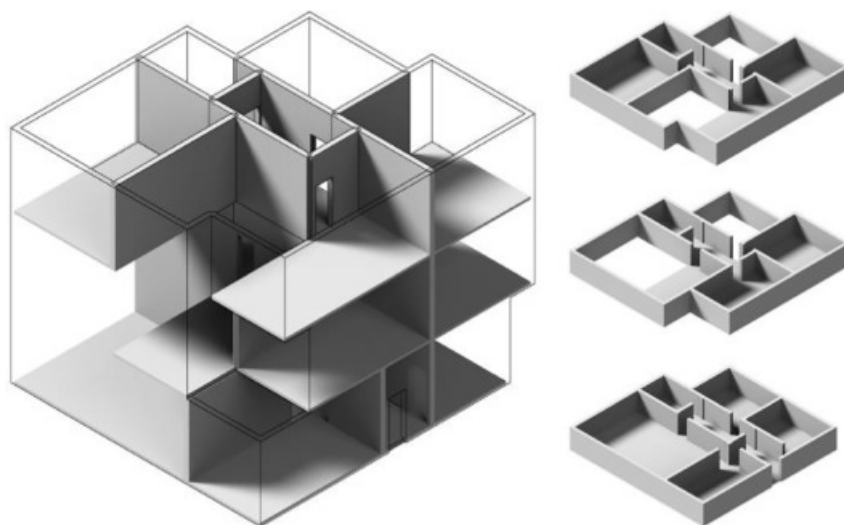


Рис. 9. Пространственная компоновка, созданная на основе пузырьковой диаграммы: левое изображение визуализируется без внешней стены, а правые изображения разделены на слои. Ц. Го и Б. Ли, 2017 г.

невозможно создать изогнутые помещения (рис. 9).

В 2017 г. Ц. Го и Б. Ли представили метод автоматического проектирования распределения пространства с подходом, аналогичным тому, который ранее использовал А. Дулгеракис, который разработал внутренние многоугольные конструкции, представляющие границу здания [13, 14].

В 2001 г. С. Майлз, М. Сиск и Д. Мур разработали систему поддержки принятия решений для концептуального проектирования коммерческих офисных зданий, которую они назвали BGRID, полная информация о BGRID представлена в диссертации М. Сиска [17, 18, 19]. Предыдущая работа продемонстрировала необходимость поддержки, а не

замены проектировщика в процессе принятия решений, поэтому стиль системы должен быть стилем системы поддержки принятия решений [20]. Он использует генетический алгоритм в качестве инструмента поиска, предоставляющего проектировщику жизнеспособные варианты проектирования, а не инструмент оптимизации, и включает в себя высокий уровень знаний о структурном проектировании и его ограничениях. Процесс проектирования фокусируется на плане этажа и определении расположения колонн на основе широкого спектра критериев, включая требования к освещению, стратегии вентиляции, ограничения, налагаемые доступными размерами типичных строительных материалов и доступными структурными системами.

Авторы отметили, что система позволяет пользователям быстро исследовать пространство дизайна и рассмотреть множество вариантов. Также подчеркнули, что она прошла обширную оценку, и могут гарантировать, что ее форма и характеристики подходят и соответствуют потребностям выбранной пользователем области проектирования.

В 2018 г. Б. Экичи, Ч. Чубукчуоглу, М. Туррин и С. Сарийылдыз провели обзор перформативной компьютерной архитектуры

(PCA), которая использует эволюционную и групповую оптимизацию для достижения целей, связанных с устойчивостью, стоимостью, функциональностью или структурой [20]. Эта структура состоит из трех основных этапов, а именно создание формы, оценка производительности и оптимизация (рис. 10). Основная цель PCA — найти геометрию, которая лучше всего соответствует целям, связанным с производительностью, на этапе концептуального проектирования.

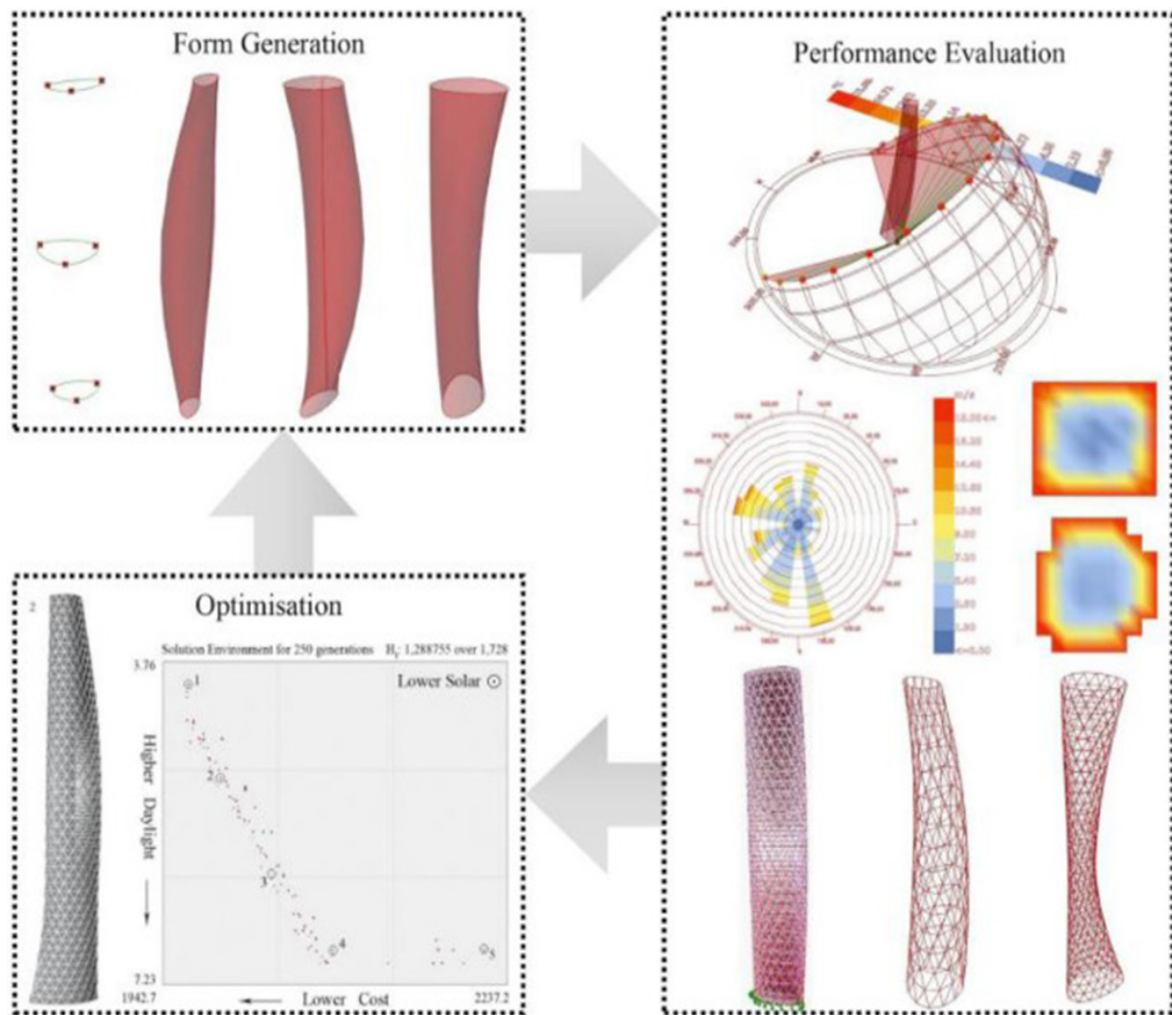


Рис. 10. Структура перформативной компьютерной архитектуры (PCA). Б. Экичи, Ч. Чубукчуоглу, М. Туррин и С. Сарийылдыз, 2018 г.

Авторы отметили, что один алгоритм может превзойти другой только в решении конкретной проблемы, поскольку архитектурные проекты являются уникальными проблемами из-за их целей, графика строительства, ограничений, ожиданий клиентов и воздействия на окружающую среду, поэтому необходимо изучить разные алгоритмы и сравнить их с решением одного и того же, проблемы архитектурного проектирования, чтобы принять более подходящие проектные

решения. Однако авторы этого обзора отметили, что очень немногие исследования сравнивали применение различных алгоритмов роевых и эволюционных вычислений (SEC) к одной и той же проблеме архитектурного проектирования.

Заключение

Представлен обзор применения современных методов искусственного интеллекта для решения задач концептуального проектирования в архитектуре. Стоит отметить

значительный рост количества публикаций, начиная с 2015 г. За последние несколько лет количество исследований с использованием методов искусственного интеллекта для решения концептуальных задач проектирования в архитектуре выросло на 85%. В последних исследованиях не прослеживаются тенденции к решениям по оптимизации формы. Если в конце прошлого века исследования были ориентированы на изучение дизайна и морфогенеза как источника вдохновения для дизайнера посредством создания сложных и неожиданных форм, то сейчас большинство исследований направлено на улучшение уже

существовавших дизайнов, в частности, чтобы оптимизировать их формы.

Что касается используемых методов искусственного интеллекта, то в подавляющем большинстве проанализированных статей используются разные подходы, которые применяются для создания инновационных, креативных, эффективных и эстетически привлекательных архитектурных объектов с хорошими эксплуатационными характеристиками. На данный момент нейронные сети служат не только инструментом оптимизации, но и важным компонентом методологии проектирования.

Литература

1. Х. Сонг, Ж. Габусси, Т. Д. Квон. Архитектурное проектирование многоквартирных домов с использованием генетического алгоритма неявного избыточного представления. На машине. Строительство, 2016. – С. 166-173.
2. А. Агирбас. Определение формы фасада с помощью роевого интеллекта на машине. Строительство, 2019. – С. 140 – 151.
3. Дж. С. Геро. На пути к модели исследования в автоматизированном проектировании. Формальные методы проектирования для САПР, 1994. – С. 315-336.
4. С. Велькен. Вычислительное роение: культурный метод генеративной архитектуры. След, 2014. – С. 9-24.
5. П. Коутс, Н. Хили, К. Лэмб, У. Л. Вун. Использование клеточных автоматов для изучения архитектурных правил снизу вверх. Еврографика Великобритании, глава 14-й ежегодной конференции, 1996. – С. 26-28.
6. К. Круз, Дж. Каракевич, М. Кирли. На пути к реализации составной модели клеточных автоматов для исследования пространства проектирования, CAADRIA 2006, Мельбурнский университет, Мельбурн, 2016. – С. 187-196.
7. К.М. Херр, Р.С. Форд. Клеточные автоматы в архитектурном проектировании: от универсальных систем к конкретным инструментам проектирования. Автомат. Констр, 2016. – С. 39-45.
8. Р.И. Пасос Перес. Стирание границ между реальным и искусственным в архитектуре и городском дизайне посредством использования искусственного интеллекта. Канд. диссертация. Университет да Корунья, Испания, 2017. – С. 45-56.
9. Джей Джин, Джей Джонг. Оптимизация формы здания свободной формы для минимизации внешней тепловой нагрузки с использованием генетического алгоритма. Энергетическая постройка, 2014. – С. 473-482.
10. А.Э. Динчер, Г. Чагдаш, Х. Тонг. Вычислительная модель проектирования массового жилья как инструмент поддержки принятия решений. Процедура. Окружающая среда наук, 2014. – С. 270-279.
11. С.К. Араги, Р. Стоуффс. Исследование клеточных автоматов для генерации форм жилых зданий высокой плотности. Констр, 2015. – С. 152-162.
12. К. Конис, А. Гамас, К. Кенсек. Пассивная производительность и форма здания: основа оптимизации для поддержки проектирования на ранних стадиях. Солнечная энергетика, 2016. – С. 161-179.
13. Цз. Го, Б. Ли. Эволюционный подход к проектированию пространственной архитектуры, дополненный агентной системой поиска топологии. Передний. Архитектор. Рез., 6 (1), 2017. – С. 53-62.
14. А. Дулгеракис. Генетическое программирование и раскрытие эмбриологии в автоматизированном планировании компоновки. Кандидатская диссертация UCL (Университетский колледж Лондона), 2007. – С. 165-174.
15. П. Меррел, Э. Шкуфза, В. Колтун. Компьютерные макеты жилых домов. Транзакции АСМ в графике (ТОG), АСМ, 2010. – С. 181.
16. Э. Родригеш, А. Р. Гаспар, А. Гомес. Подход к проблеме многоуровневого распре-

деления пространства в архитектуре с использованием гибридного эволюционного метода. Автомат. Констр, 2013. – С. 482-498.

17. Джей Си Майлз, Джи Сиск, Си Джей Мур. Концептуальное проектирование коммерческих зданий с использованием генетического алгоритма, 2001. – С. 1583-1592.

18. Г.М. Сиск. Использование DSS на основе ГА для реалистично ограниченного проектирования зданий. Кандидатская диссертация. Кардиффская инженерная школа, Кардиффский университет, Великобритания, 1999. – С. 45-61.

19. Джей Си Майлз, Си Джей Мур, Дж. Прайс. Модели расчета затрат на проектирование: применение эвристической замены, 1995. – С. 521-531.

20. Б. Экичи, Ч. Чубукчуоглу, М. Туррин, И.С. Сарийылдыз. Перформативная вычислительная архитектура с использованием роевой и эволюционной оптимизации: обзор. Строительство окружающая среда, 2018. – С. 356-371.

References

1. Antonov, E.V. Socio-cultural factors of innovative activity of the population [research report] / E.V. Antonov, A.A. Auzan, V.A. Bryzgalin, V.A. Voronenko, A.V. Zolotov, E.N. Nikishina, N.A. Pripuzov, S.A. Trukhachev. – M.: Inst. Nat. projects; Grew up. venture company, 2019. – 124 pp. H. Song, J. Gabussi, T. D. Kwon. Architectural design of multi-family buildings using implicit redundant representation genetic algorithm. On the Machine. Construction., 2016. – 166-173 pp.

2. A. Agirbas. Facade form determination using swarm intelligence. On the Machine. Construction, 2019. – 140-151 pp.

3. J. S. Gero. Towards a model of research in computer-aided architectural design. Formal methods in CAD, 1994. – 315-336 pp.

4. S. Velken. Computational flocking: a cultural method for generative architecture. Next, 2014. – 9-24 pp.

5. P. Coates, N. Hilly, K. Lamb, W. L. Wun. Using cellular automata in bottom-up architectural rule exploration. UK Eurographics 14th Annual Conf, 1996, 26-28 pp.

6. K. Kruze, J. Karakovich, M. Kirli. Towards implementing a composite cellular automaton model for design space exploration, CAADRIA., 2006, University of Melbourne, Melbourne, 2016. – 187-196 pp.

7. KM Herr, RS Ford. Cellular automata in architectural design: from universal systems to specific design tools. Comput. Constr, 2016. – 39-45 pp.

8. RI Pasos Perez. Blurring the boundaries between real and artificial in architecture and urban design through the use of artificial intelligence. PhD dissertation. University of A Coruña, Spain, 2017. – 45-56 pp.

9. Jay Jin, Jay Jong. Shape optimization of free-form building for minimizing external thermal loads using genetic algorithm. Energy Build, 2014. – 473-482 pp.

10. AE Dincher, G. Chagdash, H. Tong. Computational mass housing design model as a decision support tool. Procedia. Environ. Sci, 2014. – 270-279 pp.

11. SC Aragi, R. Stouffs. Investigating cellular automata for generating high-density residential building forms. Comput. Constr, 2015. – 152-162 pp.

12. K. Konis, A. Gamas, K. Kensek. Passive building performance and form: the foundation for optimization to support early-stage design. Solar Energy, 2016. – 161-179 pp.

13. C. Go, B. Lee. Evolutionary approach to spatial architectural design augmented with topology seeking agent system. Front. Archit. Res., 6 (1), 2017. – 53-62 pp.

14. A. Dulgerakis. Genetic programming + embryology unfolding in computational layout planning. PhD dissert. UCL (University College London), 2007. – 165-174.

15. P. Merrell, E. Schkufza, V. Kolton. Computer-generated residential house layouts. ACM Trans. Graph. (TOG), ACM, 2010. – 181 pp.

16. E. Rodrigues, A. R. Gaspar, A. Gomes. Multi-level spatial allocation problem in architecture using a hybrid evolutionary approach. Comput. Constr, 2013. – 482-498 pp.

17. Jay S. Miles, G. Sisk, C. J. Moore. Conceptual design of commercial buildings using genetic algorithm, 2001. – 1583-1592 p.

18. GM Sisk. Using GA-based DSS for realistically constrained building design. PhD dissertation. Cardiff Engineering School, Cardiff University, UK, 1999. – 45-61.

19. Jay S. Miles, C. J. Moore, J. Price. Design cost calculation models: heuristic substitution application, 1995. – 521-531 pp.
20. B. Ekici, C. Chubukcuoglu, M. Turrin, I. S. Sariyildiz. Performative computational architecture using swarm and evolutionary optimization: a review. Constr. Build. Environ, 2018. – 356-371 pp.

Пичугов П. А.,

аспирант кафедры Архитектуры, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия. E-mail: pashkes421@gmail.com

Шабиев С. Г.,

заведующий кафедрой «Архитектура», доктор архитектуры, профессор, заведующий кафедрой «Архитектура», почетный архитектор России, Южно-Уральский Государственный Университет, г. Челябинск, Россия. E-mail: shabievsg@susu.ru

Pichugov P. A.,

graduate student of the Department of Architecture, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: pashkes421@gmail.com

Shabiev S. G.,

Head of the Department of Architecture, Doctor of Architecture, Professor, Head of the Department of Architecture, Honorary Architect of Russia, South Ural State University, c. Chelyabinsk, Russia. E-mail: shabievsg@susu.ru

Поступила в редакцию 01.12.2023