

Энергосбережение и энергоэффективность

УДК 004.896

© Я. А. Голикова, студентка
(Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: golikova.ya@mail.ru

© С. В. Киселёв, студент
(Санкт-Петербургский государственный
университет, Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: ambrazura257@outlook.com

© Л. В. Талипова, ст. преподаватель
(Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: talipova_lv@spbstu.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-3-77-87

© Y. A. Golikova, student
(Peter the Great St. Petersburg Polytechnic
University, St. Petersburg, Russia)

E-mail: golikova.ya@mail.ru

© S. V. Kiselyov, student
(St. Petersburg State University,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: ambrazura257@outlook.com

© L. V. Talipova, senior lecturer
(Peter the Great St. Petersburg Polytechnic
University, St. Petersburg, Russia)

E-mail: talipova_lv@spbstu.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕРАТИВНОГО ДИЗАЙНА ПРИ РАСЧЕТЕ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

APPLICATION OF GENERATIVE DESIGN IN THE CALCULATION OF SOLAR EXPOSURE PARAMETERS

В данной работе выполнен анализ интенсивности солнечного света путем компьютерного моделирования с применением технологий генеративного дизайна, а также рассмотрен способ автоматической расстановки офисных помещений с помощью метода машинного обучения в программном комплексе Rhinoceros 3D при помощи инструментов Rhino Grasshopper, Ladybug tools и Honeybee tools. Создан алгоритм, способный автоматизировать расстановку помещений с учетом теплонагрева от солнечного излучения как критерия комфортности среды, а также анализировать параметры теплового воздействия от солнечного излучения для каждого помещения. Полученные данные могут применяться при расстановке мебели в рабочем пространстве и выборе способов защиты от солнечного воздействия, а также для теплотехнического расчета.

Ключевые слова: генеративный дизайн, машинное обучение, нейросеть, компьютерное моделирование, инсоляция, освещенность.

In this paper, the analysis of the sunlight intensity by computer modeling using generative design technologies is performed. The method of automatic placement of office premises using the machine learning method in the Rhinoceros 3D software package using Rhino Grasshopper, Ladybug and Honeybee tools is considered. An algorithm has been created that can automate the placement of premises taking into account solar heating from solar radiation as a criterion for the environment comfort, and analyze the parameters of thermal exposure from solar radiation for each premise. The data obtained can be used in the arrangement of furniture in the workspace and the choice of methods of solar exposure protection, as well as for thermal calculation.

Keywords: generative design, machine learning, neural networks, computer modeling, insolation, illumination.

Введение

В настоящее время, в век информационных технологий, происходит стремительное ускорение научно-технического прогресс-

са, затрагивающего практически все сферы жизни. Современный ритм жизни требует от человека быстрого реагирования, оперативной обработки больших объемов данных,

а также высокоскоростного обмена информацией. Все эти факторы, а также стремление человечества к чему-то новому, более технологичному и необычному способствуют развитию технологий с применением искусственного интеллекта, таких как генеративный дизайн (ГД) [1–3].

Генеративный дизайн (Generative design, GD) — это технология проектирования и дизайна, работа которой основана на программных алгоритмах, способных самостоятельно, без участия дизайнера или проектировщика, и за счет машинного обучения разрабатывать множество решений поставленной задачи и оптимизировать их в соответствии с исходными требованиями [4–5]. Автоматизация процессов при помощи машинного обучения позволяет многократно увеличить производительность, снизить трудозатраты людей, а также найти наиболее рациональное и нестандартное решение задачи в кратчайшие сроки за счет обработки большого объема данных, которые обработать вручную практически невозможно, при этом уменьшается вероятность появления ошибок, которые при привычном проектировании выявляются на этапе строительства или эксплуатации [6].

При работе с генеративным дизайном задача человека сводится к заданию исходных данных и ограничений, затем запускается работа алгоритмов, и программа генерирует тысячи вариантов, тестирует конфигурации и учится на каждой итерации, что работает, а что нет, анализирует их и представляет пользователю наиболее оптимальные решения. Генеративный дизайн может быть использован в качестве решения для преодоления ограничений, связанных с нехваткой данных.

Существует четыре основных направления в применении генеративного дизайна:

- создание оптимальной формы или изображения в соответствии с исходными данными;

- оптимизация топологии, то есть очистка формы от всего лишнего с учетом

вводных параметров — создание конструкции с наилучшими физическими свойствами (максимальной жесткостью) и минимальной массой при этом;

- оптимизация поверхностей и конструкции трехмерных решеток;

- трабекулярные структуры — происходит высокоточное масштабирование и распределение микроскопических пор в любых твердых материалах, благодаря чему формируется шероховатая поверхность.

Технологии генеративного дизайна применяются во многих сферах деятельности, ведь они открывают новые возможности при создании продукта, позволяют экспериментировать, разрабатывать более рискованные решения задач, выходящие за рамки того, что может создать только человек, в разы быстрее и дешевле [7–10]. Применение генеративного дизайна наиболее эффективно при реализации проектов совместно с BIM-технологиями [11–13]. Информационное моделирование сооружений (Building Information Modeling) — это процесс создания согласованной, взаимосвязанной пространственной информационной модели объекта строительства или уже существующего сооружения, в которой все элементы скоординированы между собой и содержат определенную числовую информацию [14, 15]. На X Международной научно-практической конференции, посвященной 113-летию РЭУ им. Г.В. Плеханова, авторами статьи [16] был обозначен технологический переход от BIM-технологий к BIM-инструменту, подчеркнута его основное предназначение для проектирования, визуализации и расчетных возможностей.

Еще одна описываемая авторами статьи [17] возможность — использование Цифрового двойника в качестве имитационной модели «а что, если?». Модель будет обладать всеми возможными данными, и при дополнительно прописанном программном комплексе можно будет запускать сценарии

с заданными условиями — от схем управления энергопитанием до попытки перехвата управлением комплекса. В последовательном рассуждении в статье [17] описывается технологический переход уже до уровня Цифрового двойника города. Модели BIM соединяются уже в ГИС (Геоинформационной системе), и в результате автор приходит к новому понятию CIM (City Information Model) — информационной модели города. Далее рассказывается об уже упомянутых IoT и Digital Twin (цифровой двойник города) и представляется следующая ступень использования — киберпространство, наложенное на физическую реальность (которое можно сравнить и с так называемой «метавселенной», описанной в работе [18] как пространственный цифровой двойник в Индустрии 5.0).

В отличие от источника [16] в статье [17] утверждается о возможности работы BIM с Big Data через ГИС, но сам процесс передачи и обработки данных или их инструменты не описаны. Данная статья содержит важную выборку из законодательных актов РФ, которые определяют все перечисленные понятия и сферу их возможностей, что объективно повышает ее актуальность по сравнению с аналогичными в конкретный момент времени.

В данной работе рассматривается применение генеративного дизайна при зонировании пространства высотного здания научно-исследовательского института (НИИ) с учетом инсоляции и освещенности. Высотное здание спроектировано с витражным остеклением на 360°, в связи с чем в период повышенной солнечной активности с южной стороны здания могут возникать проблемы с микроклиматом рабочей среды на площади порядка 800 м² офисного пространства на каждом этаже. Соответственно, для комфортного пребывания и работы сотрудников в этих зонах производится оценка пиковых солнечных воздействий для последующей эффективной планировки пространства.

Методы

Для данной статьи основополагающим является метод компьютерного моделирования, по результатам которого выполнен анализ и сравнение данных. Также в работе выполнен отбор и теоретический анализ научной литературы по теме исследования.

Для оценки и наглядного визуального представления необходимо создать модель самого здания и окружающего пространства, а также построить траекторию движения солнца для выбранной точки на местности. Существует множество программных комплексов как коммерческих, так и свободно распространяемых, позволяющих определить энергоэффективность здания, провести анализ света, уровня освещенности пространства и бликов. Оценка и расчеты параметров солнечного воздействия будут проведены в одном из ведущих программных комплексов для подобного вида расчетов — Rhinoceros 3D при помощи инструментов Rhino Grasshopper, Ladybug tools и Honeybee tools [19, 20]. Данный комплекс универсален по своему предназначению, изначально он не создавался для архитектурных решений. Это всего лишь инструмент нодового (или визуального) программирования, когда код идет не сплошным текстом, а визуализирован в виде отдельных блок-схем и связей между ними. Огромное количество штатных инструментов, библиотек и разнообразных дополнительных плагинов, находящихся в свободном доступе, позволяет менять предназначение этой программы от моделирования городской среды до анализа геометрии и физических процессов. А настраиваемая визуализация результатов дает возможность в том же окне настроить необходимую картинку, содержащую определенные объекты и информацию.

Для получения результатов и их оценки необходимо составить скрипт — набор команд и функций, составленных в логической последовательности для обработки исходных данных. В случае ошибок в исходных

данных или их неполноты или ошибок между блок-схемами программа визуально подсветит связи или блоки, нуждающиеся в доработке.

При создании скрипта используются общедоступные данные и наработки, которые в процессе работы модернизируются — добавляются критические исправления и дополнения. Таким образом, из шаблона формируется подходящая под конкретную задачу схема.

Модель окружающей застройки создается в ПК QGIS с подключением дополнительных модулей QuickOSM, QuickMapServices, Coordinate Capture. С их помощью выгружаются из общедоступной базы полигоны зданий на выбранной местности с некоторыми данными о них (например, этажность, функциональное назначение, телефоны). После выгрузки данный участок сохраняется в файл расширением .shp — векторный формат для хранения объектов.

Для создания объемов зданий и уточненного расположения объектов с учетом угла поворота и выбранной системы координат необходимо написать скрипт в ПК Rhino с помощью визуального языка программирования Grasshopper и плагина Heron.

Суть работы скрипта заключается в том, что из сохраненного файла берутся координаты точек полигонов, атрибутика этих полигонов (в данном случае этажность), меняется угол поворота и происходит установка в определенную систему координат. Далее из атрибутики берется количество этажей (при необходимости вручную корректируется в QGIS, например, добавляется проектируемое здание, которого еще нет на карте). В конечном итоге получается визуальное представление здания в пространстве (рис. 1).

Построение модели солнца происходит с помощью скрипта, который из исходных данных (координат, часового пояса и заданного времени) с учетом коэффициен-

тов (в зависимости от размера расчетного пространства) подбирает размер условного представления солнечного шара и его условной орбиты вокруг заданной точки. Также создаются элементы ручного управления временем в самом скрипте — при необходимости можно задать время, и скрипт отобразит солнце там, где оно и должно быть.

Два эти скрипта, параллельно запущенные в одном файле, дают визуальное отображение, представленное на рис. 2.

С учетом функциональных характеристик здания и его высотности возникает потребность в автоматизации проектирования. Помимо технической и материальной базы (наличия программных комплексов, электронных средств передачи, просмотра и хранения информации) все еще остаются рутинные этапы проектирования.

Рассмотрим способ автоматической расстановки помещений с помощью метода машинного обучения. Проблема расстановки заключается в том, что невозможно спроектировать универсальный этаж для научного института и расположить его на всех 25 этажах. Даже офисные помещения каждого этажа, в зависимости от сферы научных изысканий, требуют разной компоновки и количества помещений.

Суть машинного обучения заключается в том, чтобы обучить искусственный интеллект (ИИ) самостоятельно расширять свои навыки и познания в необходимой человеку

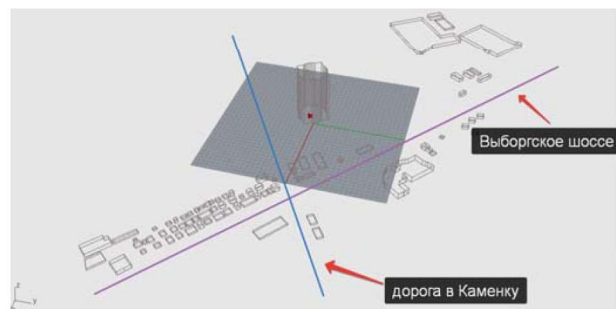


Рис. 1. Визуальная модель проектируемого здания и окружающей застройки

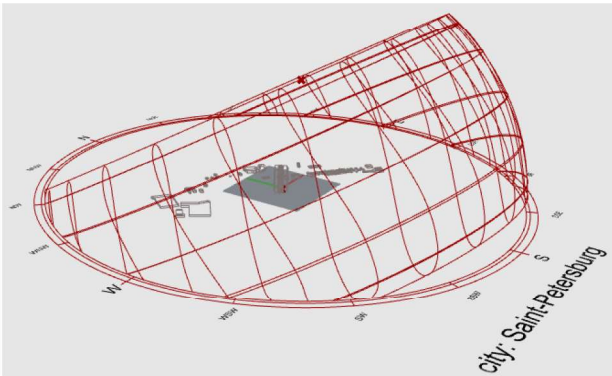


Рис. 2. Визуальное отображение результатов работы двух скриптов

области, чтобы точнее и быстрее выполнять свою работу. Нейронные сети в рамках логики устроены близко к той модели, которая описывает работу человеческого мозга, при этом нейронная сеть лишена человеческого фактора — при должной настройке компонентов процент ошибок и неточностей минимален. Одним из важных компонентов, необходимых для работы искусственного интеллекта, является набор данных. Это широкое понятие объединяет все возможные массивы и формы данных. Машинное обучение основывается на первичном наборе данных, на основе которого алгоритмы, заложенные в искусственном интеллекте, в дальнейшем самостоятельно отстраивают закономерности и логические цепочки и выдают различные результаты — от поиска объектов до создания картин и музыки. В данном проекте был выбран меньший масштаб: предпринята попытка научить ИИ расставлять помещения на этаже.

Исходными данными является план этажа в формате .dwg, импортированный из модели здания (рис. 3).

Основная необходимая информация для расчетов — это контуры помещений и окна. Размеры, оси, двери удаляются. Рассортируем все оставшиеся линии по слоям: Outline (границы расчетной модели, в данном случае контур этажа с вырезом под лестнично-лифтовой узел, так как он не может изменять

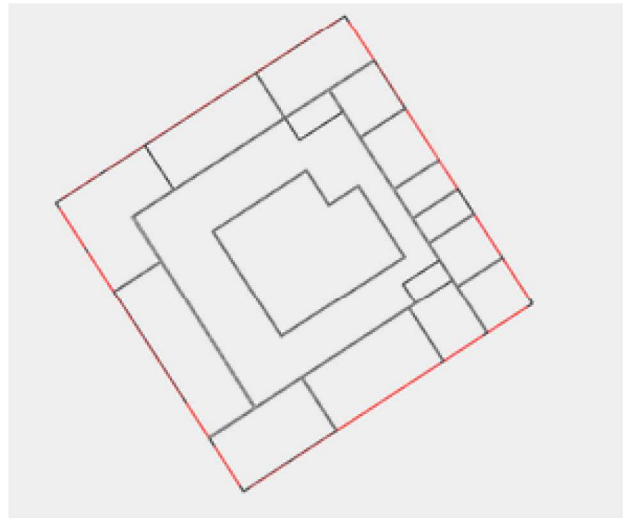


Рис. 3. Модель этажа в ПК Rhino

свое расположение и конфигурацию, для работы нейронной сети является ненужной информацией), Windows (контуры окон), Rooms (контур помещений). Все используемые линии должны быть полилиниями.

Далее указывается в среде Grasshopper для алгоритма путь к данным — вышеречисленным линиям. С помощью нодов (рис. 4) алгоритм «прочитает» данные геометрии двух слоев — Outline и Windows. Границы помещений необходимо указать вруч-

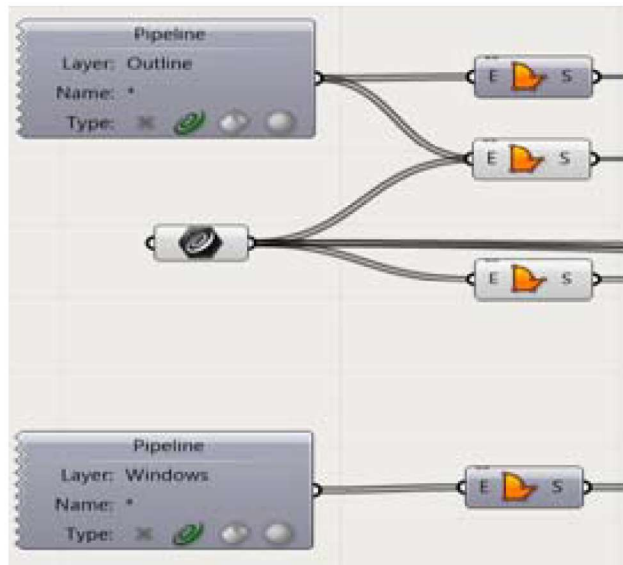


Рис. 4. Определение входных данных

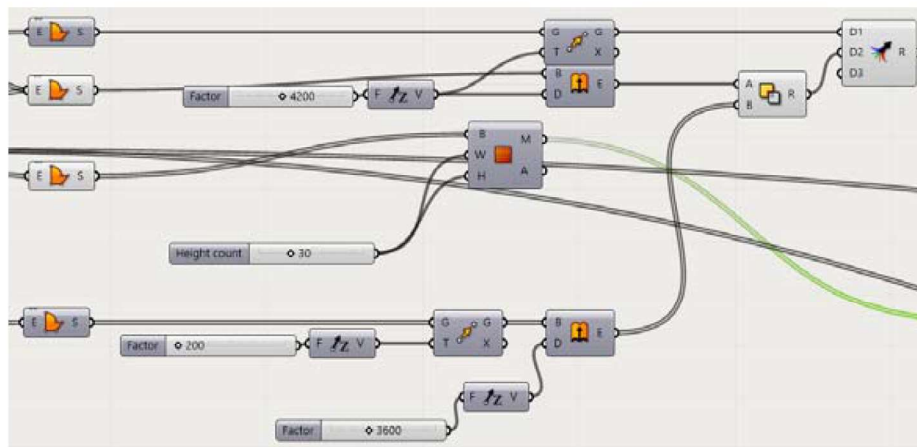


Рис. 5. Выдавливание геометрии в объем

ную, выбрав все линии слоя Rooms. Данные геометрии преобразуются в тип объектов Surface (поверхность).

Далее идет работа по выдавливанию объемов помещений (рис. 5). На основе введенных данных о высоте этажа, высоте нижней грани окна (в данном случае витражного остекления с учетом технологических стыков с перекрытием, примем высоту 200 мм) скрипт выдавливает объемы. Поверхности помещений разбиваются в сетку с шагом 30 мм, это действие будет необходимо для визуального представления модели. В конце выполнения данного модуля программа переупаковывает новую геометрию в единый формат, которым в дальнейшем будут пользоваться другие модули.

Представленная геометрия, а также еще два варианта планировок будут использоваться в качестве объектов для обучения алгоритма. В рамках данной работы для обучения использовалось только три варианта планировок из-за сжатых сроков реализации проекта, но даже этого хватило для адекватной работы алгоритма. В дальнейшей работе по обучению рекомендовано применение большего количества объемно-планировочных решений для более эффективной работы алгоритма. Необходимо также создать еще один план — он уже будет тестовым.

Следующий модуль анализирует инсоляцию (рис. 6). Здесь исходными данными будут: геометрия объемной модели этажа, файл из открытых источников в сети Интер-

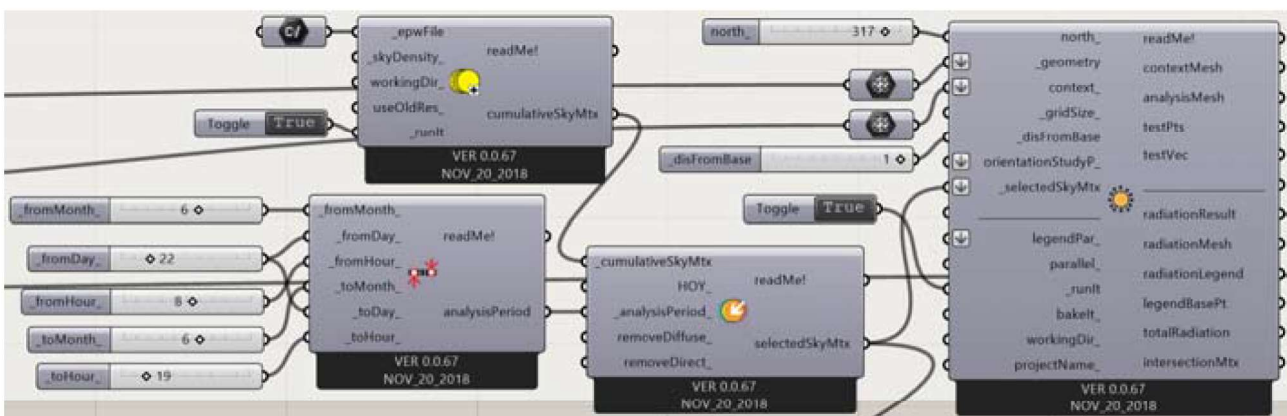


Рис. 6. Модуль анализа инсоляции

нет с данными о погодных условиях Санкт-Петербурга с 2007 до 2021 гг. Файл формата .erw. Также созданы слайдеры, которые настраивают временной промежуток анализа с точностью до часов в сутках.

Далее работаем с наименованием помещений, которые указываем исходя из того, в каком порядке алгоритм их пронумеровал. Алгоритм использует не текст названия, а номера строк, сведенных к неповторяющемуся списку, т. е. если на этаже 3 кабинета, офис и столовая, программа будет использовать список, содержащий информацию о ка-

бинете, офисе и столовой. Число дублирующихся помещений будет использоваться уже при сортировке и переборе вариаций.

В конечном итоге вся информация приходит в модуль с машинным обучением (рис. 7). В данном модуле алгоритм анализирует входные данные и, перебирая указанное число раз возможные варианты, выявляет причинно-следственные связи в данных.

Результаты и обсуждение

По истечению количества повторений нейронная сеть предлагает готовый вариант разбивки на помещения (рис. 8).

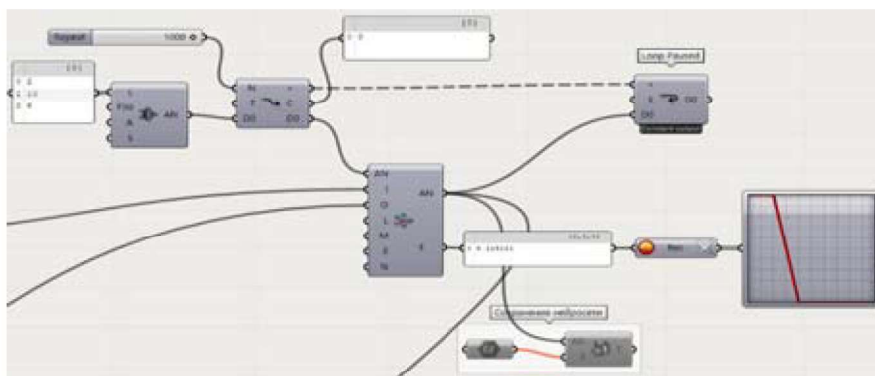


Рис. 7. Модуль обучения нейронной сети

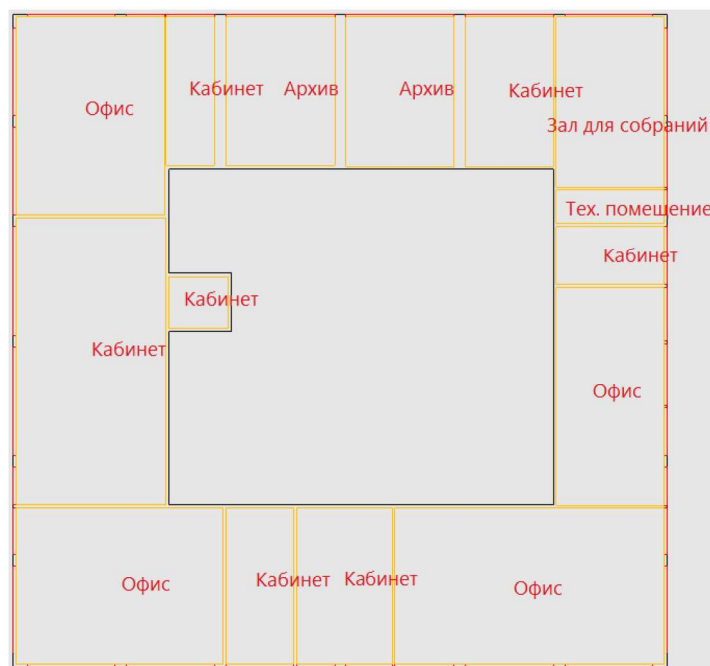


Рис. 8. Результаты контрольного испытания № 1

Для проверки корректности работы можно провести еще одно контрольное испытание. Для этого попробуем внести в алгоритм условие — у технического помещения нет естественного источника освещения (окон). Были добавлены 2 помещения внутри контура этажа с отсутствием элементов из слоя Windows. В уже предложенном варианте расположения данная взаимосвязь была выделена неточно — подобное помещение было размечено системой как кабинет. Это объясняется тем, что в исходных данных у одного из кабинетов значение солнечной радиации было минимальным.

Во втором контрольном испытании (рис. 9) нейронная сеть, похоже, выявила закономерность, специально внедренную в исходные данные. Технические помещения были созданы по тем же правилам, что и запроектированные изначально человеком.

Проведенные испытания доказывают состоятельность написанного алгоритма — при наличии базовых причинно-следственных связей и некоторого объема входных данных для обучения нейронная сеть выявляет эти связи и дает ожидаемые результаты. В ре-

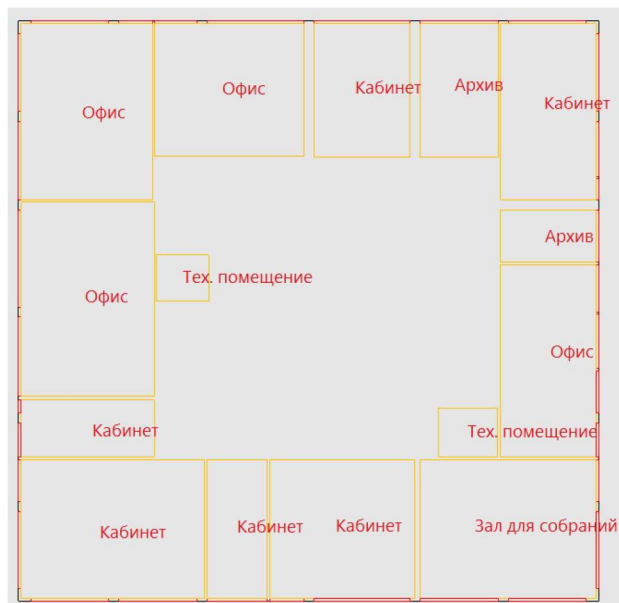


Рис. 9. Результаты контрольного испытания № 2

альном использовании в категорию связей будет входить больше условий и правил, чем в данном исследовании, соответственно и объем входных данных будет по аналогии большим.

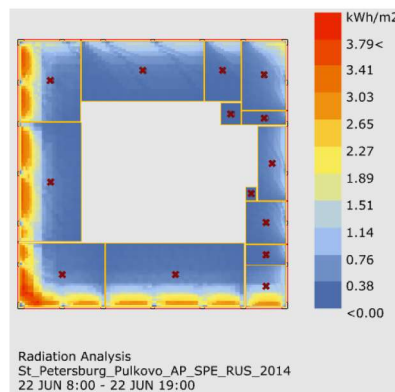


Рис. 10. Анализ инсоляции на запроектированном этаже

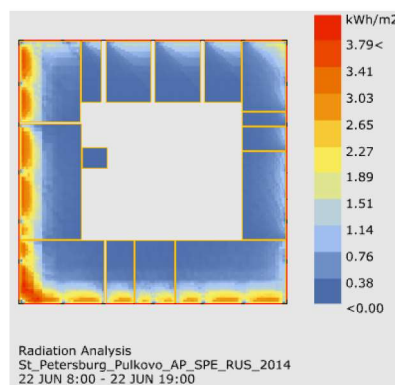


Рис. 11. Анализ инсоляции на этаже из контрольного испытания № 1

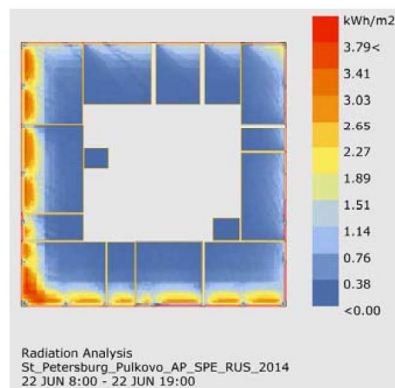


Рис. 12. Анализ инсоляции на этаже из контрольного испытания № 2

Рассчитанная инсоляция запроецированного этажа и расстановка помещений (рис. 10) позволили обучить нейронную сеть для автоматизации расстановки помещений офисного здания (рис. 11, 12).

Результаты расчетов показали, что в помещении, подверженном наибольшему значению инсоляции (рис. 13), основное тепловое воздействие от солнечного излучения приходится на площади от 1 до 3,5 м² от ограждающих витражных конструкций фасада, следовательно, при проектировании стационарных рабочих мест необходимо либо располагать эти места на удалении от ограждающих конструкций (т. е. размещать в глубине помещения), либо предусматривать элементы защиты от солнечного воздействия.

Выводы

Таким образом, в данной работе был создан алгоритм, способный автоматизировать расстановку помещений с учетом теплонагрева от солнечного излучения как критерия комфортности среды. Предложенные варианты расстановки помещений нейронной сетью учитывают необходимость естественного освещения в офисных помещениях и их отсутствие в помещениях хранения инвентаря и архива. Также в процессе работы про-

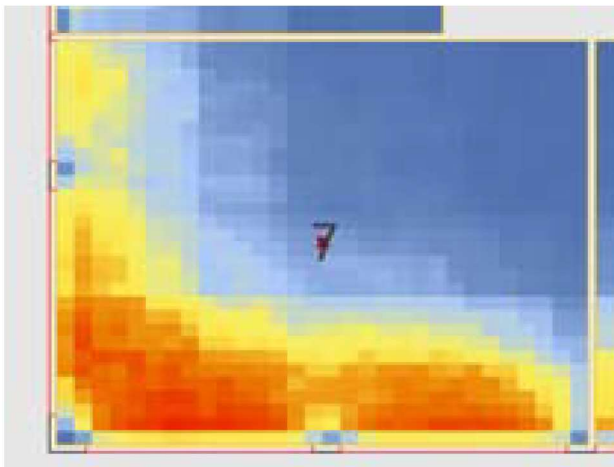


Рис. 13. Результаты анализа отдельного офисного помещения

изводится анализ параметров теплового воздействия от солнечного излучения для каждого помещения, результаты которого применимы для теплотехнического расчета, при распределении рабочих мест и других работ.

Полученный алгоритм способен оптимизировать работу и сэкономить время при проектировании зданий, в особенности высотных.

Библиографический список

1. Шмагин В. С., Маслова М.А. Обзор и анализ развития искусственного интеллекта // Научный результат. Информационные технологии. 2020. № 4. С. 3–8.
2. Giacomello E., Lanzi P. L., Loiacono D. Doom level generation using generative adversarial networks // 2018 IEEE Games, Entertainment, Media Conference (GEM). IEEE. 2018. Pp. 316–323.
3. Yoo S. et al. Integrating deep learning into CAD/CAE system: generative design and evaluation of 3D conceptual wheel // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2021. №. 4 (64). Pp. 2725–2747.
4. Пархимович А., Краснова А., Воейко О. Генеративный дизайн как новая ступень проектирования // Управление качеством на этапах жизненного цикла технических и технологических систем: сб. науч. тр. Всерос. науч.-техн. конф., Курск, 30–31 мая 2019 г. Курск: Юго-Западный гос. ун-т. Том 2. 2019. С. 125–129.
5. Лаушкина А. А., Басов О. О. Применение методов генеративного дизайна с использованием мультимодальных данных в сфере архитектуры и градостроительства // Научный результат. Информационные технологии. 2021. №3 (6). С. 3–10.
6. Малашенкова В. А., Черницкая А. Ю. Генеративный дизайн — революционный метод проектирования // Студент года 2020: сб. ст. Междунар. науч.-иссл. конкурса, Петрозаводск, 11 мая 2020 г. Петрозаводск: Междунар. центр науч. партнерства «Новая Наука». 2020. С. 128–139.
7. Мухнурова И. Г., Булатова А. К. Современные технологии проектирования в строительстве и дизайне. Их влияние на архитектуру // Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Комсомольск-на-Амуре. 16–18 декабря 2019 г. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре гос. ун-т, 2020. С. 59–63.
8. Титова М. А., Громов А. Ю. Генеративный дизайн на основе оптимизации топологии с использова-

нием глубокого обучения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 2. С. 246–248.

9. Zaimis I., Giannakis E., Savaidis G. Generative design case study of a CNC machined nose landing gear for an unmanned aerial vehicle // Savaidis IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. С. 1024. DOI: 10.1088/1757-899X/1024/1/012064.

10. Giacomello E., Lanzi P. L., Loiacono D. Doom level generation using generative adversarial networks // 2018 IEEE Games, Entertainment, Media Conference (GEM). IEEE. 2018. С. 316–323.

11. Mukkavaara J., Sandberg M., Architectural Design Exploration Using Generative Design: Framework Development and Case Study of a Residential Block // Buildings. 2020. №10, 201.

12. Терех М. Д., Донова Д. И. Перспективы развития функционально-планировочных решений жилой среды с использованием генеративного дизайна // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 21–23 апреля 2021 г. СПб.: СПбГАСУ. 2021. С. 230–239.

13. Землянская А. Генеративный дизайн для городского планирования. URL: https://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=20197 (дата обращения: 01.12.2022).

14. Рыбин Е. Н. и др. BIM-технологии // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2019. Т. 9, №. 1 (28). С. 98–105.

15. Перцева А. Е., Волкова А. А., Хижняк Н. С., Астафьева Н. С. Особенности внедрения BIM-технологии в отечественные организации // Интернет-журнал Науковедение. 2017. Т. 9, № 6. С. 51.

16. Дмитриев А. Н., Журавлев Г. С., Верзун В. А. Перспективы разработки цифровых двойников для эксплуатации «Умных домов» // Современные проблемы управления проектами в инвестиционно-строительной сфере и природопользовании: материалы X науч.-практ. конф., посвященной 113-летию РЭУ им. Г. В. Плеханова, Москва, 08–12 апреля 2020 г. М.: РЭУ им. Г. В. Плеханова. 2020. С. 201–210.

17. Захарова Г. Б. Как BIM перерастает в CIM и в цифровой двойник города // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 21–23 апреля 2021 г. СПб.: СПбГАСУ. 2021. С. 27–36.

18. Шкарупета Е. В., Колесникова В. Б., Белянцева О. М. Метавселенная как пространственный цифровой двойник в Индустрии 5.0 // Экосистемы в цифровой экономике: драйверы устойчивого развития. Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. С. 96–116.

19. Матюхина М. А., Крутов А. А. Исследование BIM-технологий для оценки энергоэффективности

жилых зданий // Устойчивое развитие науки и образования. 2018. № 12. С. 282–291.

20. Garcia M., Freitas M., Souza R., Veloso A. Comparison of daylighting simulation workflows and results using plugins for BIM and 3D Modeling programs: application on early phases of design process // International Building Physics Conference (IBPC). 2018.

References

1. Shmagin V. S., Maslova M.A. *Obzor i analiz razvitiya iskusstvennogo intellekta* [Review and analysis of the development of artificial intelligence]. *Nauchniy rezul'tat. Informatsionnye tekhnologii – Scientific Result. Information Technologies*, 2020, no. 4, pp. 3–8.

2. Giacomello E., Lanzi P. L., Loiacono D. Doom level generation using generative adversarial networks. 2018 IEEE Games, Entertainment, Media Conference (GEM). IEEE, 2018, pp. 316–323.

3. Yoo S., et al. Integrating the deep learning techniques into CAD/CAE system: generative design and evaluation of 3D conceptual wheel. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2021, no. 4 (64), pp. 2725–2747.

4. Parkhimovich A., Krasnova A., Voeyko O. *Generativniy dizayn kak novaya stupen' proektirovaniya* [Generative design as a new stage of design]. *Trudy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Kursk, 30–31 maya 2019 goda "Upravlenie kachestvom na etapakh zhiznennogo tsikla tekhnicheskikh i tekhnologicheskikh sistem"* [Proceedings of the All-Russian scientific and technical conference, Kursk, May 30–31, 2019 "Quality management at the stages of the life cycle of technical and technological systems"]. Kursk, Yugo-Zapadniy gosudarstvenniy universitet Publ., 2019, vol. 2, pp. 125–129.

5. Laushkina A. A., Basov O. O. *Primenenie metodov generativnogo dizayna s ispol'zovaniem mul'timodal'nykh dannykh v sfere arkhitektury i gradostroitel'stva* [Application of generative design methods using multimodal data in architecture and urban planning]. *Nauchniy rezul'tat. Informatsionnye tekhnologii – Scientific Result. Information Technologies*, 2021, no. 3 (6), pp. 3–10.

6. Malashenkova V. A., Chernitskaya A. Yu. *Generativniy dizayn — revolyutsionniy metod proektirovaniya* [Generative design as a revolutionary design method]. *Trudy Mezhdunarodnogo nauchno-issledovatel'skogo konkursa, Petrozavodsk, 11 maya 2020 goda. Petrozavodsk «Student goda 2020»* [Proceedings of the International research competition, Petrozavodsk, May 11, 2020. Petrozavodsk "Student of the year 2020"]. *Mezhdunarodniy tsentr nauchnogo partnerstva «Novaya Nauka» Publ.*, 2020, pp. 128–139.

7. Mukhnurova I. G., Bulatova A. K. *Sovremennye tekhnologii proektirovaniya v stroitel'stve i dizayne* [Modern design technologies in construction and design]. *Trudy*

Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Komsomol'sk-na-Amure. 16–18 dekabrya 2019 goda “Regionalnye aspekty razvitiya nauki i obrazovaniya v oblasti arkhitektury, stroitel'stva, zemleustroystva i kadastr v nachale III tysyacheletiya. Ikh vliyaniye na arkhitekturu” [Proceedings of the International Scientific-Practical Conference, Komsomolsk-on-Amur, December 16–18, 2019 “Regional aspects of science and education development in the field of architecture, construction, land management and cadastres at the beginning of the III millennium. The influence on architecture”]. Komsomol'sk-na-Amure, Komsomol'skiy-na-Amure gosudarstvenniy universitet Publ., 2020, pp. 59–63.

8. Titova M. A., Gromov A. Yu. *Generativniy dizayn na osnove optimizatsii topologii s ispol'zovaniem glubokogo obucheniya* [Generative design based on topology optimization using deep learning technique]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – Bulletin of Tula State University. Technical Sciences*, 2022, no. 2, pp. 246–248.

9. Zaimis I., Giannakis E., Savaidis G. Generative design case study of a CNC machined nose landing gear for an unmanned aerial vehicle. Savaidis IOP Conference Series, *Materials Science and Engineering*, 2021, pp. 10–24. DOI: 10.1088/1757-899X/1024/1/012064.

10. Giacomello E., Lanzi P. L., Loiacono D. Doom level generation using generative adversarial networks. 2018, IEEE Games, Entertainment, Media Conference (GEM), *IEEE*, 2018, pp. 316–323.

11. Mukkavaara J., Sandberg M. Architectural Design Exploration Using Generative Design: Framework Development and Case Study of a Residential Block. *Buildings*, 2020, no. 10, 201 p.

12. Terekh M. D., Donova D. I. *Perspektivy razvitiya funktsional'no-planirovochnykh resheniy zhiloy sredy s ispol'zovaniem generativnogo dizayna* [Prospects for the development of functional-planning solutions of the residential environment using generative design]. *Trudy IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 21–23 aprelya 2021 goda* “BIM-modelirovanie v zadachakh stroitel'stva i arkhitektury” [Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference, Saint-Petersburg, April 21–23, 2021 “BIM-modelling in the tasks of construction and architecture”]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2021, pp. 230–239.

13. Zemlyanskaya A. *Generativniy dizayn dlya gorodskogo planirovaniya* [Generative design for urban planning]. Available at: https://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=20197 (accessed: 01.12.2022).

14. Rybin E. N. i dr. *BIM-tekhnologii* [BIM-technologies]. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' – Bulletin*

of Higher Schools. Investment. Construction. Real Estate, 2019, vol. 9, no. 1 (28), pp. 98–105.

15. Pertseva A. E., Volkova A. A., Khizhnyak N. S., Astaf'eva N. S. *Osobennosti vnedreniya BIM-tekhnologii v otechestvennyye organizatsii* [Features of the introduction of BIM-technology in domestic organizations]. *Internet-zhurnal Naukovedenie – Internet-Journal History of Science*, 2017, vol. 9, no. 6, 51 p.

16. Dmitriev A. N., Zhuravlev G. S., Verzun V. A. *Perspektivy razrabotki tsifrovyykh dvoynikov dlya ekspluatatsii «Umnykh domov»* [Prospects of development of digital twins for operation of Smart Houses]. *Trudy X nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 113–letiyu REU im. G. V. Plekhanova, Moskva, 08–12 aprelya 2020 goda* “Sovremennyye problemy upravleniya proektami v investitsionno-stroitel'noy sfere i prirodopol'zovaniy” [Proceedings of the X scientific-practical conference dedicated to the 113-th anniversary of Plekhanov Russian Economic University, Moscow, April 08–12, 2020 “Modern Problems of Project Management in Investment-Construction and Environmental Management”]. Moscow, REU im. G. V. Plekhanova Publ., 2020, pp. 201–210.

17. Zakharova G. B. *Kak BIM pererastaet v CIM i v tsifrovoy dvoynik goroda* [How BIM grows into CIM and the digital twin of the city]. *Trudy IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 21–23 aprelya 2021 goda* “BIM-modelirovanie v zadachakh stroitel'stva i arkhitektury” [Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference, Saint Petersburg, April 21–23, 2021 “BIM-modeling in the tasks of construction and architecture”]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2021, pp. 27–36.

18. Shkarupeta E. V., Kolesnikova V. B., Belyantseva O. M. *Metavseleennaya kak prostranstvenniy tsifrovoy dvoynik v Industrii 5.0* [Meta-Universe as a spatial digital twin in Industry 5.0]. *Ekosistemy v tsifrovoy ekonomike: drayvery ustoychivogo razvitiya* [In: Ecosystems in digital economy: drivers of sustainable development]. St. Petersburg, POLITEKk-PRESS Publ., 2021, pp. 96–116.

19. Matyukhina M. A., Krutov A. A. *Issledovanie BIM-tekhnologiy dlya otsenki energoeffektivnosti zhilykh zdaniy* [Investigation of BIM-technologies for assessing the energy efficiency of residential buildings]. *Ustoychivoe razvitie nauki i obrazovaniya – Sustainable development of science and education*, 2018, no. 12, pp. 282–291.

20. Garcia M., Freitas M., Souza R., Veloso A. Comparison of daylighting simulation workflows and results using plugins for BIM and 3D Modeling programs: application on early phases of design process. *International Building Physics Conference (IBPC)*, 2018.