

Раздел 1. Градостроительство

УДК 721.021.23

ПОТЕНЦИАЛ ГЕНЕРАТИВНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИ АДАПТИВНОМ ПОВТОРНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПАМЯТНИКОВ ПРОМЫШЛЕННОЙ АРХИТЕКТУРЫ

Козодаева В.С., Бардина Г.А.

ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
e-mail: valerija.kozodoy@mail.ru

Аннотация: В статье рассматривается применение генеративного дизайна для функционального зонирования объектов промышленного наследия при адаптивном повторном использовании. Предложена методика параметризации существующего здания и требований к размещаемым функциям с использованием Rhino, Grasshopper, Ladybug и Galapagos. Выполнено сравнение ручного и генеративного подходов на примере промышленного корпуса зального типа.

Предмет исследования: Функциональное зонирование объектов промышленного наследия средствами генеративного дизайна.

Материалы и методы: Цифровая модель промышленного корпуса зального типа, параметрическое моделирование в Rhino и Grasshopper, анализ освещённости в Ladybug и оптимизация вариантов зонирования с помощью Galapagos.

Результаты: Разработана и апробирована методика генеративного функционального зонирования. Генеративный вариант показал более высокую экономическую эффективность по сравнению с ручным проектированием и позволил выявить дополнительные сценарии использования пространства.

Выводы: Генеративный дизайн может эффективно применяться на этапе предпроектного анализа при реконструкции объектов промышленного наследия, сокращая трудозатраты и повышая качество принимаемых решений.

Ключевые слова: реконструкция, реновация, адаптивное повторное использование, генеративный дизайн, промышленная архитектура, объекты культурного наследия.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из ключевых задач современных городов является восстановление памятников культурного наследия, в частности - промышленной архитектуры, которая формировалась начиная с 18го века, а в период с 1830-1910 годов обрела уникальный облик [1]. Сохранившиеся до наших дней строения имеют коммерческий потенциал, как отражение истории и противопоставление современному строительству, к тому же часто находятся в удобной пешеходной и транспортной доступности.

Для восстановления практикуется адаптивное повторное использование, что означает процесс перестройки и изменение здания в соответствии с новыми требованиями и присвоение новой функции. Однако все еще большая часть территорий на практике остается неосвоенной [2-4]. Причина — отсутствие быстрой и наглядной оценки их инвестиционной привлекательности. Прежде чем принимать решение о вложениях, необходимо провести предпроектный анализ: насколько эффективно здание может быть приспособлено под новые функции. Такая работа требует серьёзных трудозатрат: архитекторы неделями прорабатывают возможные сценарии зонирования, учитывают значимость объекта в общей структуре города, особенности объемно-планировочной структуры, ранее связанной со спецификой производства, конструктивные ограничения, естественное освещение, потоки посетителей, социально-экономическое развитие территории. Неготовность своевременного проведения объемного анализа оставляет многие объекты либо надолго «в тени», либо вовсе исключаются из числа рассматриваемых.

Таким образом, встает необходимость в инструменте, который позволит проводить предпроектный анализ быстро, рационально и с учётом ключевых факторов. В данном исследовании предлагается решение этой задачи с помощью генеративного дизайна — цифрового метода, позволяющего автоматически генерировать и оценивать десятки вариантов функционального зонирования на основе заданных критериев. Генеративный дизайн — это методология проектирования, при которой автор использует компьютерные технологии, позволяющие творить посредством управления процессом автоматизированной генерации создаваемых объектов [5]. Предполагается, что данный подход позволит ускорить процесс разработки предпроектных решений и принять во внимание большее количество факторов, нежели использование ручного метода [6].

Генеративный дизайн в настоящее время активно развивается как часть архитектурного инструментария, ориентированного на работу с данными, параметрическими зависимостями и автоматизацией проектных решений. Применение генеративных алгоритмов выходит за рамки экспериментального формообразования и всё чаще направлено на решение прикладных задач — в частности, распределение функций в пределах заданного объёма, организация оптимальных сценариев использования пространства, моделирование внешней среды и конструктивных параметров. В рамках архитектурной практики генеративные методы используются преимущественно при проектировании новых объектов — жилых, офисных, общественных, а также при разработке градостроительных решений

[7-11]. Акцент в большинстве работ делается на задаваемых пользователем параметрах, целевых функциях и автоматическом переборе допустимых конфигураций с целью получения оптимального варианта по выбранным критериям — от геометрических характеристик конструкций и пространств, до экологических и экономических показателей [12-17]. Однако несмотря на быстрое распространение метода, его потенциал в области реконструкции, особенно при работе с объектами индустриального наследия, остаётся практически не исследован. Между тем именно такие объекты представляют собой устойчивую и всё более востребованную проектную задачу, в которой требуются не универсальные формы, а логика адаптивного и одновременно эффективного преобразования. Это создаёт предпосылки для более глубокого включения генеративного инструментария в процессы предпроектного анализа, функционального зонирования и сценарного моделирования в условиях реконструкции.

Настоящее исследование направлено на проверку применимости генеративного дизайна для задач адаптивного повторного использования существующих промышленных зданий. В частности, речь идёт о производственных корпусах зального типа — это одноэтажные здания с большими пролётами и одним объёмом (цеха, мастерские, ангары), которые, как правило, возводились без перекрытий и внутренних несущих стен, и составляют заметную часть индустриального наследия в российских городах.

Исследование предлагает методику того, какие параметры здания и требования к функциям мы учитываем, а затем как преобразовываем в исходные данные для генеративного дизайна. Далее мы получаем вариант функционального зонирования, предлагаемый инструментом и по заданным критериям оценки сравниваем с ручной расстановкой функций и делаем вывод о работоспособности инструмента и рациональности его использования. Для реализации генеративного дизайна предлагается использовать ПО Rhino (Grasshopper).

МЕТОДЫ И ПРИНЦИПЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предлагаемый метод предпроектного анализа основан на принципе взаимодействия двух областей исходных данных: физических характеристик существующего здания и требований для размещения функций внутри объёма. Методика расписывает как исходные данные преобразовать в параметры, по каким правилам они будут зависеть относительно друг друга при поиске оптимального функционального зонирования (для ручного и генеративного проектирования), а также как их задать в программе (скрипте).

Центральная задача – необходимо найти такое функциональное зонирование, при котором

требования функций совпадают с возможностями здания (пересечение первой и второй областей входных данных): сделать это сначала вручную, а потом генеративным дизайном. Задать эту информацию в скрипт необходимо в виде условий и правил, который должны соблюдаться программой, чтобы итоговое размещение функций было корректным.

Первая область данных – физические характеристики существующего здания. Здания зального типа представляют собой одну из наиболее распространённых форм промышленной архитектуры. Планировочные и конструктивные решения подчинены технической логике, что сформировало набор характерных признаков, позволяющих выделить зальные корпуса как отдельную типологию. К числу пространственных особенностей зданий зального типа относятся: большая площадь в плане, часто без внутренних несущих перегородок, значительная высота помещений, обеспечивающая возможность размещения оборудования и хорошую вентиляцию, наличие крупных оконных проёмов в фасадах и/или зенитных фонарей на кровле, каркасная или рамно-сетевая конструкция, допускающая гибкую трансформацию, архитектурный декор ограничен и сведен к индустриальной эстетике — арочным проёмам, ритмике кладки, венчающим карнизам.

Так как речь идет о сохранении и защите, из данных особенностей можно сформировать жесткие параметры (ограничения), которые будут учитываться при функциональном зонировании.

- габариты и конфигурация корпуса;
- расположение входов и их доступность с улицы;
- ориентация по сторонам света;
- размещение окон, зенитных фонарей и другие источники естественного освещения;
- допустимые зоны размещения хозвъезда и логистических сценариев;
- охраняемые элементы (например, оконные проёмы), которые не могут быть изменены по законодательным причинам.

Вторая область данных – требования к размещению функций. Это характеристики функций, которые потенциально могут быть размещены в здании:

- диапазон допустимой площади;
- допустимое соотношение сторон (функции могут быть вытянутыми как по оси x так и по оси y, но при этом нельзя быть слишком узкими);
- требования к освещению: боковое (от окон), верхнее (от фонарей), или возможность функционирования без естественного света;
- возможность прохождения потока через зону (например, фудкорт допускает транзит, лекторий — нет);
- желательная близость к фасаду (загрузки-разгрузки возле фасада, граничащего с хоззоной, или какие-то входные функции около главного фасада);

– ожидаемая арендная доходность за квадратный метр (чистая прибыль).

Таким образом, каждая функция описывается набором гибких параметров, в рамках которых возможны вариации.

Ручной метод. Для определения эффективности генеративного подхода в исследовании был выполнен изначально ручной вариант функционального зонирования. Этот метод основывается на профессиональной интуиции и последовательном переборе вариантов с анализом их пространственной логики. Вручную расставляются функции внутри корпуса, исходя из их требований к освещению, связям с фасадами, проходимости и логике размещения относительно входов. Процесс зонирования проходил итеративно: сначала выполнялась расстановка функций, затем анализировалась логика получившегося варианта, после чего принималось решение — скорректировать текущую расстановку или перейти к новому сценарию. Всего было рассмотрено около 15–20 вариантов, из которых финальным стал наиболее сбалансированный по освещению, логике потоков и экономике.

Такой подход позволяет опираться на архитектурный опыт и интуицию, но требует значительных временных затрат и ограничен количеством вручную созданных конфигураций. Получившийся вариант был использован как база для сравнения с результатами генерации.

Метод с использованием генеративного дизайна. Методика исследования основана на применении генеративного дизайна в среде параметрического моделирования Rhino + Grasshopper, с использованием плагинов Ladybug и Galapagos. Основная цель методики — автоматизированный подбор оптимального функционального зонирования существующего промышленного здания зального типа на основе совокупности архитектурных, пространственных и экономических параметров.

Подготовка модели. На первом этапе создаётся цифровая модель исследуемого здания в среде Rhino. Исходными данными для моделирования служат архивные чертежи, обмерные данные и облако точек. После построения модели внутреннее пространство корпуса делится на регулярную сетку (например, 1×1 м), каждая ячейка которой становится носителем специфических характеристик, включая: наличие и интенсивность естественного освещения (рассчитывается через плагин Ladybug), расстояние до существующих входов, принадлежность или близость к конкретным фасадам, наличие зенитных фонарей или боковых окон, задающих особые режимы освещённости и данные об освещённости визуализируются в виде цветовой градации на плоскости здания.

Учет потоков и фасадной ориентации. Существующие входы обозначаются точками с геометрическими координатами и логической значимостью (основной вход, хозвход и пр.), в

зависимости от внешнего контекста и направления потенциальных потоков посетителей. Между точками входа формируются условные траектории движения, отражающие предполагаемые маршруты использования здания. Если необходимо задать конкретную ориентацию функции вдоль определённого фасада, вдоль него формируется направляющая линия, ограничивающая область поиска решений для этой функции.

Параметризация функций. Каждая функция описывается через набор параметров: минимальная и максимальная площадь (в процентах от общей), допустимое соотношение сторон, требуемый уровень освещения (например, высокое естественное освещение для рабочих зон), возможность транзита (проходная или замкнутая функция), экономическая характеристика (арендная ставка за квадратный метр минус эксплуатационные издержки).

Функции моделируются как гибкие геометрические объекты: из случайно заданной точки внутри корпуса формируется прямоугольник, параметры которого (площадь и пропорции) выбираются случайным образом в пределах допустимых значений.

Поиск оптимального решения. Сценарий оптимизации реализуется с помощью компонента Galapagos — эволюционного алгоритма, который перебирает сотни и тысячи вариантов размещения функций, стремясь к максимизации итогового годового дохода. При каждом итерационном запуске алгоритм случайным образом размещает функции в пределах здания и присваивает им допустимые параметры, далее рассчитывает экономическую эффективность (на основе площади и ставки) и оценивает степень соответствия пространству с точки зрения освещённости, фасадной ориентации и логики потоков.

Каждая итерация проходит автоматическую проверку на предмет выполнения заданных условий. В результате формируется множество вариантов функционального зонирования, из которых оптимизатор выделяет один или несколько наилучших по совокупности критериев: чистая прибыль, соответствие освещённости, пространственная логика.

Временные параметры. Важно отметить, что значительное время требуется лишь на первоначальную настройку скрипта и адаптацию его под конкретное здание. Этот процесс занимает порядка двух часов. После этого генеративный алгоритм работает автономно, перебирая варианты в течение нескольких часов. Таким образом, в отличие от ручного проектирования, которое может занимать дни или недели, генеративный подход позволяет существенно сократить трудозатраты на этапе предпроектного анализа.

Методика на примере слесарно-сборочной мастерской

Геометрические данные здания (переход к параметрам). Создаем модель исследуемого здания в среде Rhino (рис. 1).

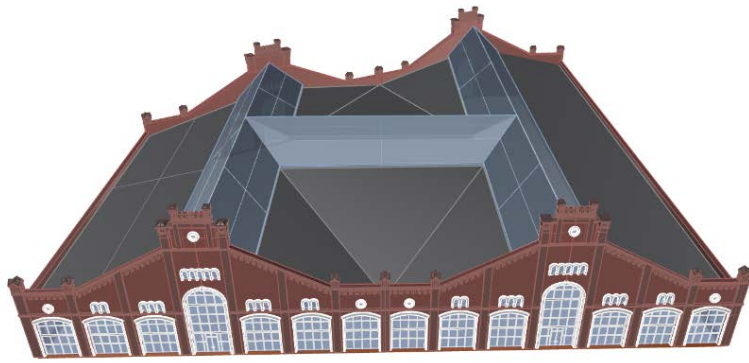


Рис. 1. Модель корпуса в Rhino 8, вид с южного фасада
Fig. 1. Model of the building in Rhino 8, view from the south façade

Задаем плоскость, ограниченную контуром внешних стен, и создаем сетку 30 на 30 ячеек. Это необходимо для процесса перебора вариаций расположения функций - центр случайной функции становится в случайную клетку (рис. 2).

Исходя из расположения на участке определено, что вход №1 и вход №2 рациональнее использовать

как главные входы для посетителей, а вход №3 и вход №4 выходят на хоззону, соответственно будут выполнять вспомогательные функции. В пространстве Rhino входы заданы точками и затем относительно них формируются потоки (рис. 2).

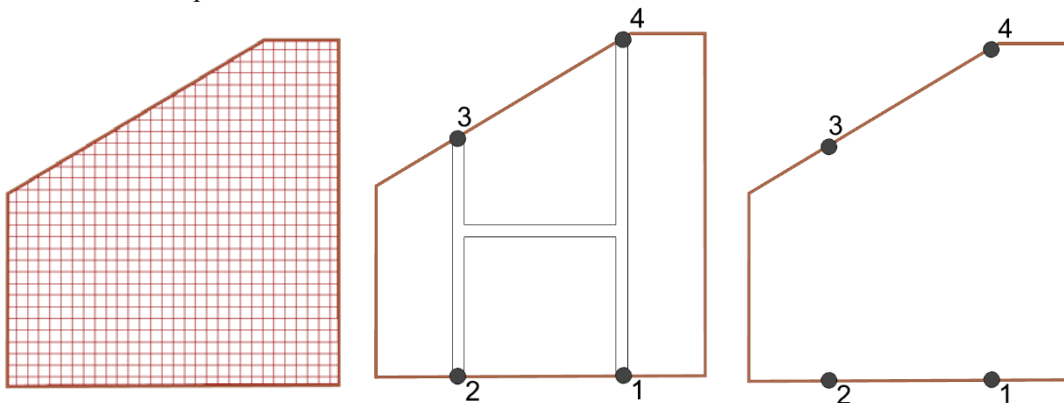


Рис. 2. План корпуса, нумерация входов и выстраивание потоков относительно точек
Fig. 2. Building plan, numbering of entrances and arrangement of flows relative to points

Чтобы обеспечить равномерную эвакуацию из здания, следует расположить потоки равномерно относительно выходов (соединить первым потоком выходы 1 и 4, вторым потоком 2 и 3, а третьим

потоком обеспечить связь первых двух потоков). Потоки формируются автоматически между точками-входами (рис. 2).

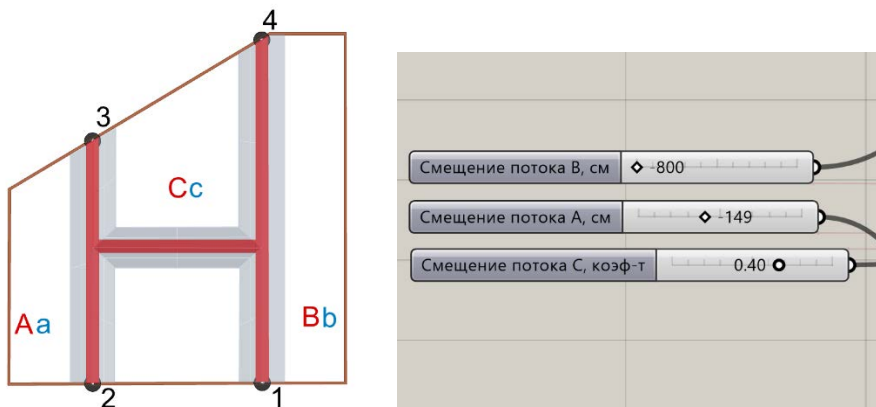


Рис. 3. Именованые зенитных фонарей и потоков и слайдеры для смещения (А, В, С - потоки, а, b, с - фонари)
Fig. 3. Naming of skylights and streams and sliders for displacement (A, B, C - streams, a, b, c - skylights)

Так как потоки расположены под зенитными фонарями, но при этом естественное освещение зенитных фонарей может быть выгодным (необходимым) для определенных функций,

следует задать гибкое смещение потоков относительно зенитный фонарей слайдерами внутри скрипта (рис. 3).

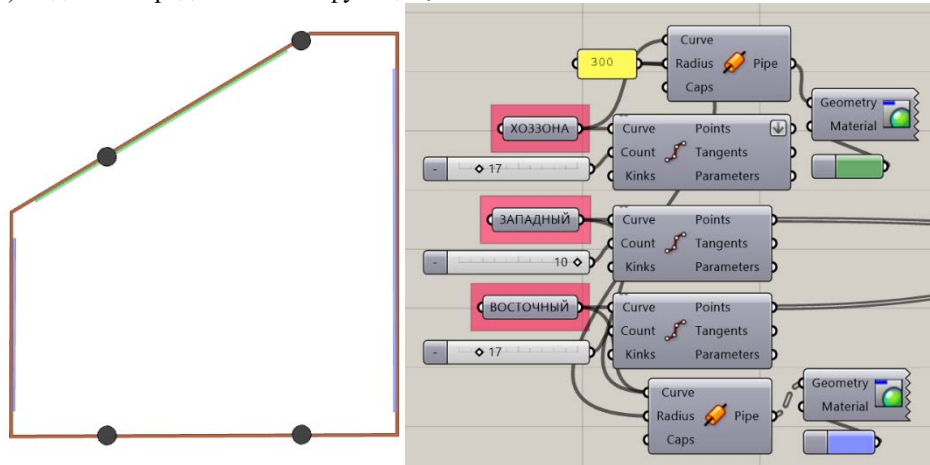


Рис. 4. Задаем фасады внутри Райно и заносим их в скрипт
Fig. 4. We define facades inside Rayno and enter them into the script

Внутри Rhino вдоль фасадов рисуем прямые, чтобы задать в скрипт информацию о том, какая функция к какому фасаду должна быть приближена. Зеленый - участок фасада, по которому будет идти перебор вариантов расположения функций, нуждающихся в связи с хоззоной. Синий - участки

фасадов, по которым будет идти перебор варианта расположения функций, нуждающихся в естественном боковом освещении. Южный фасад не рассматривается, так как на нем расположены главные входы и потребуется место вдоль него для зоны вестибюля (рис. 4).

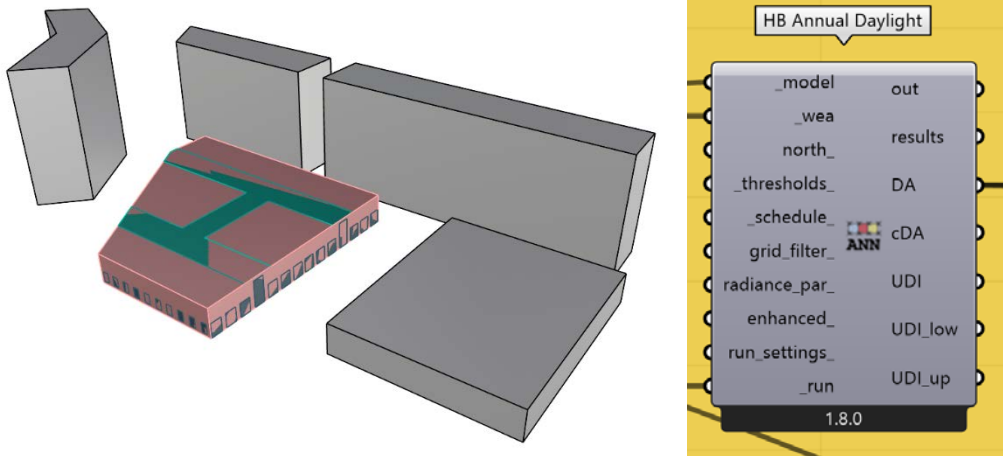


Рис. 5. Нод для анализа прохождения естественного освещения через окна и упрощенная модель корпуса с затеняющими соседними зданиями

Fig. 5. Node for analyzing the passage of natural light through windows and a simplified model of the building with shading neighboring buildings

Для оценки принадлежности зоны внутри корпуса к естественному освещению от окон и зенитных фонарей с помощью плагина LadyBug

проведен анализ (рис. 5-6). Из общего доступа взята карта СПб, включающая в себя данные о движении солнца.

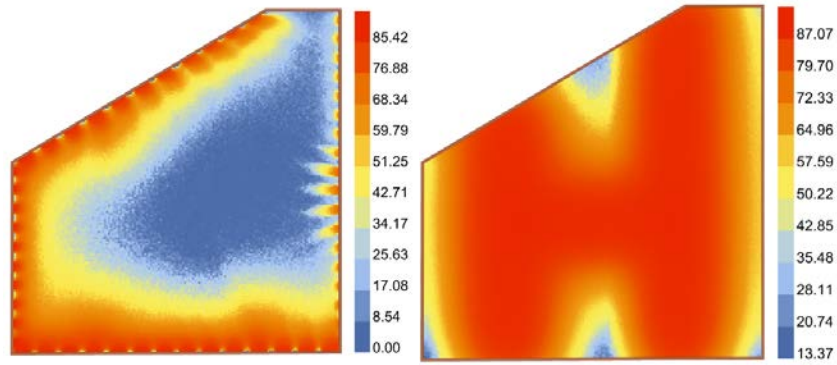


Рис. 6. Анализ естественного освещения от окон и зенитных фонарей (шкала - процент часов, в которые естественный свет попадает на сетку поверхности)

Fig. 6. Analysis of natural light from windows and skylights (scale - percentage of hours in which natural light hits the surface grid)

Для того, чтобы генератор брал во внимание количество попадание освещения в определенной функции, необходимо перевести полученный анализ в геометрию (рис. 7). Далее аналитика будет осуществляться по следующей логике: чем больше площадь пересечения функции, нуждающейся, например, в освещении от зенитного фонаря, с площадью попадания этого света, тем выгоднее встала функция.

Данные для функций (переход к параметрам).
Каждая функция формируется посредством работы скрипта следующим образом – выбирается случайная клетка пространства корпуса, вокруг нее формируется прямоугольник аналогично слайдерами случайным образом (рис. 8).

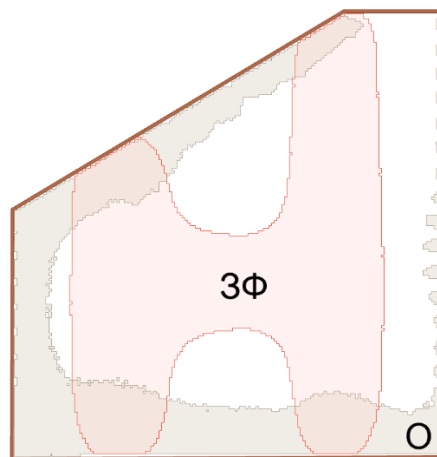


Рис. 7. Геометрическое представление естественного освещения корпуса (О - через окна, ЗФ - через зенитные фонари)

Fig. 7. Geometric representation of natural lighting of the hull (O - through windows, ZF - through skylights)

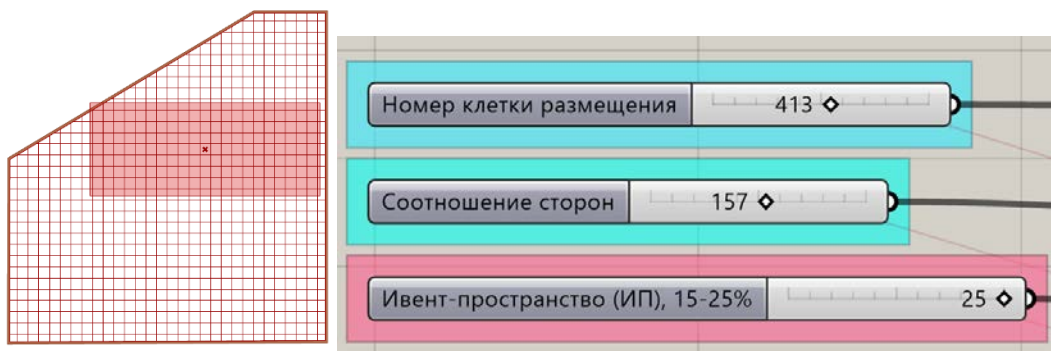


Рис. 8. Формирование функции ивент-пространства

Fig. 8. Formation of the event space function

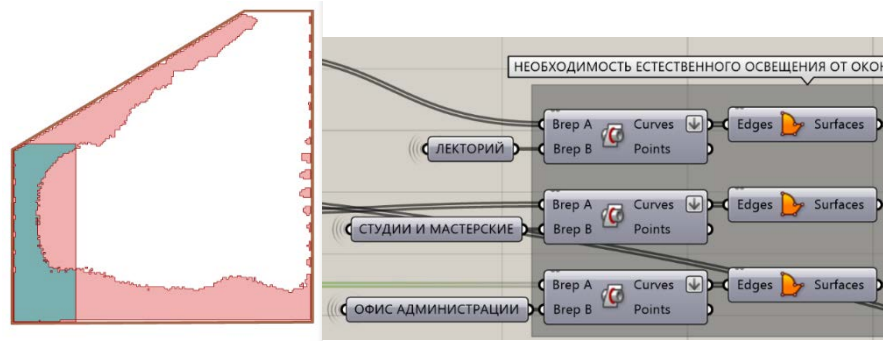


Рис. 9. Пересечение функции студий и мастерских с зоной попадания естественного бокового освещения от окон
Fig. 9. Intersection of the studio and workshop functions with the area of natural lateral lighting from the windows

Определенным функциям, нуждающимся в естественном освещении от окна или зенитного фонаря задается пересечение между зоной

попадания света и самой функцией – чем больше площадь пересечения, тем выгоднее расположение функции (рис. 9).



Рис. 10. Ивент-пространство (красное) может занимать два участка корпуса, соответственно, допускается прохождение потока сквозь данную функцию
Fig. 10. The event space (red) can occupy two sections of the body, and therefore flow is allowed to pass through this function.

Не маловажным является учесть возможно прохождения потока через определенные функции. Каким-то данная опция будет коммерчески помогать – фудкорт, а каким-то мешать – лекторий. Чтобы задать эту характеристику, разделим корпус потоками на 4 части. И для каждой функции сообщим, в скольких частях одновременно функция может находиться: если только в одной, то значит поток не может проходить через функцию, если в двух и более, то прохождение функции допускается (рис. 10).

ориентировочные значения доходности с квадратного метра в год, не являющимися точными в рамках полноценного экономического анализа. Показатели заданы на уровне допущений, достаточных для выполнения сравнительной оценки. Поскольку все сценарии рассматриваются в одинаковых исходных условиях, абсолютные значения не оказывают влияния на итоговые выводы — существенна лишь относительная разница между ними. Такой подход позволяет сосредоточиться на анализе эффективности методики функционального зонирования, а не на построении точной финансовой модели.

Для подсчета чистой прибыли от функции в год задается значение прибыли в год за один квадратный метр, затем это перемножается на площадь, которую заняла функция в корпусе (рис. 11). Для расчётов использованы усреднённые

Все параметры, на которых основана аналитика генератора, собраны в таблице 1.

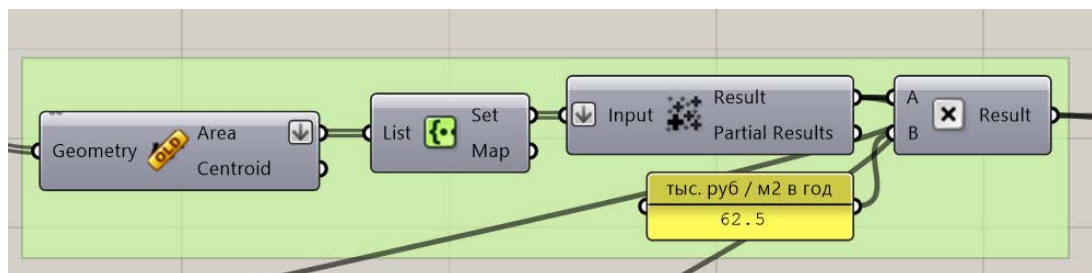


Рис. 11. Подсчет чистой прибыли в год от ивент-пространства
Fig. 11. Calculating annual net profit from event space

Таблица 1. Собранные параметры для функций
Table 1. Collected parameters for functions

№	Название функции	Описание	Процентный диапазон, %	Чистый поток, P/м ² в год
1	Ивент-пространство (ИП)	- пространство со сценой для проведения мероприятий, выставок, ярмарок, - не нуждается в естественном освещении - может проходить поток	15-20	62 500
2	Фудкорт (ФК)	объединяет кухни и столики предполагается расположение ближе к хоззоне не нуждается в освещении	15-25	80 000
3	Лекторий (ЛЕ)	необходимо боковое естественное освещение (окна) не может проходить поток	5-10	40 000
4	Студии и мастерские №1 (СМО)	требуют естественное боковое освещение (окна) не может проходить поток	15-20	57 500
5	Студии и мастерские №2 (СМБ)	не требующие естественного освещения (без окон и зенитных фонарей) может проходить поток	15-20	57 500
6	Офис администрации (ОА)	требует естественное боковое освещение (окна) не может проходить поток	3	-
7	Загрузка-разгрузка (ЗР)	необходимо расположение у фасада, граничащего с хоззоной	1	-

Запуск генерации. Все заданные в скрипте параметры подключаются к ноду Galapagos – встроенная система внутри Rhino, которая и будет

перебирать варианты, выбирая случайные параметры и анализируя возможные ситуации расположения функций (рис. 12).

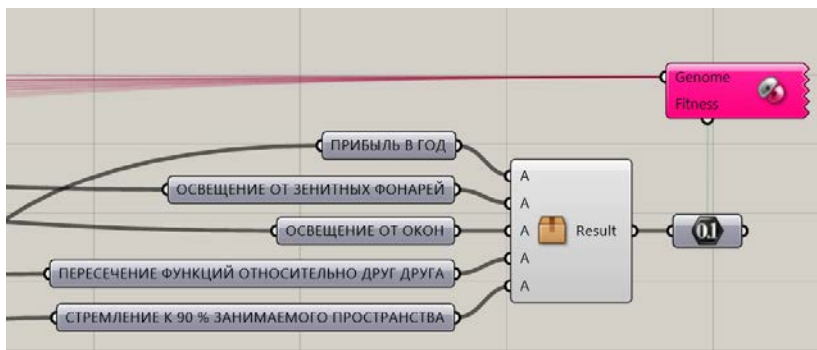


Рис. 12. Подключение параметров для генеративного дизайна к ноду Galapagos
Fig. 12. Connecting parameters for generative design to the Galapagos node

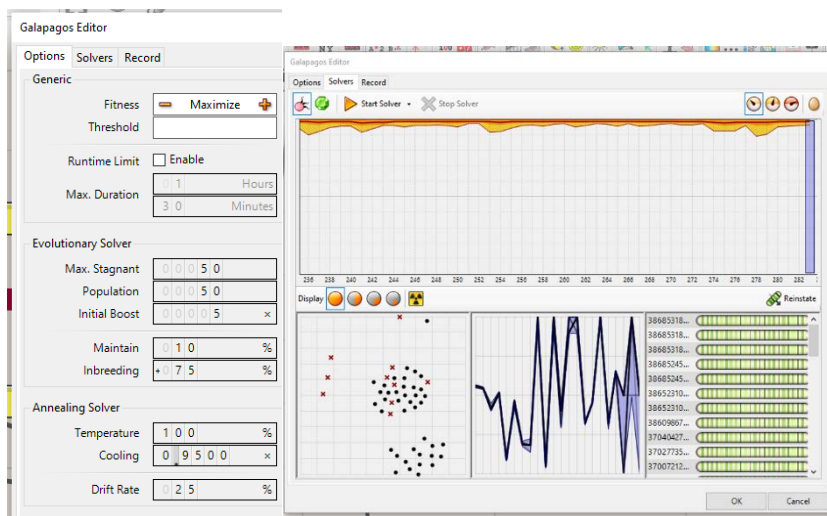


Рис. 13. Стандартные настройки перед запуском генеративного дизайна и процесс поиска решения
Fig. 13. Standard settings before running generative design and the solution search process

Основной смысл работы генеративного дизайна основан на поиске максимального или минимального решения (рис. 13). Так как количество параметров для решения заданной задачи существенное, они собраны в единую числовую функцию, которую мы максимизируем. Чем больше чистой прибыли будет получаться в зависимости от расположения функций, чем больше будет попадания функции в зону необходимого естественного освещения, чем меньше пересечение функций относительно друг друга и чем больше общая сумма функций будет стремиться к заполнению площади корпуса на 90%, тем большим будет чисто итоговой функции, следовательно, выгоднее функциональное зонирование.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнительный анализ двух вариантов функционального зонирования — ручного и полученного с помощью генеративного дизайна — показал как совпадения, так и различия, обусловленные спецификой алгоритмического подхода с учетом того, что оба результата используют 90% общей площади здания (рис. 14). В обоих вариантах функции с высокой проходимостью, такие как фудкорт и ивент-пространство, расположены в центральной части корпуса под зенитными фонарями, что обеспечивает их равнодоступность и логичную связку с остальными помещениями. Зона загрузки и разгрузки в обоих случаях ориентирована на вход №3, однако в генеративном варианте она оказалась более удалённой от фудкорта. Это допустимо с учётом концепции: производственные помещения фудкорта не предполагают полный цикл приготовления пищи и не требуют постоянной логистической связки.

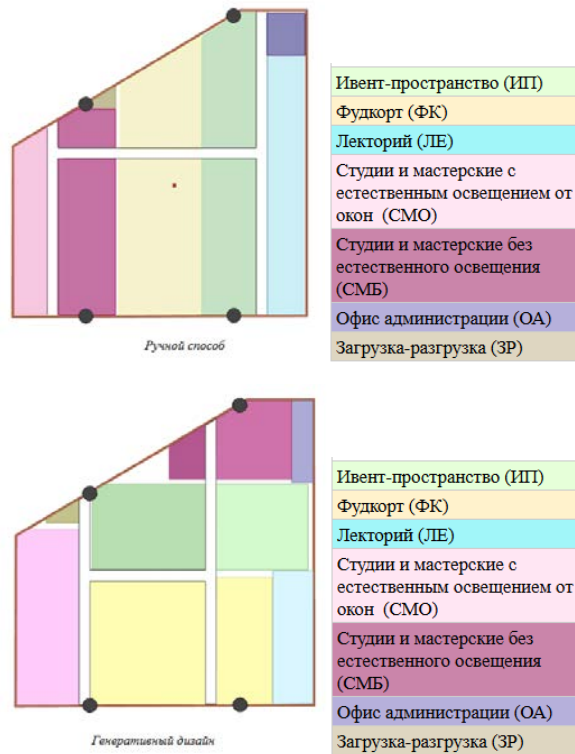


Рис. 14. Результаты расстановки ручного способа и генерации
Fig. 14. Results of manual placement and generation

Функции, требующие естественного бокового освещения — лекторий, административные помещения и мастерские дневного типа — в обоих вариантах расположены вдоль боковых фасадов. При этом генеративный алгоритм разместил функции, не нуждающиеся в освещении (например, музыкальные студии и кино-мастерские), ближе к глухому заднему фасаду. Такое решение освободило более проходимую центральную часть корпуса для размещения фудкорта, что может способствовать увеличению его клиентского трафика. Кроме того, перераспределение потоков в

генеративном варианте позволило сформировать более глубокие помещения для мастерских, что создаёт потенциал для сдачи в аренду под более масштабные, технически насыщенные производства.

Дополнительным преимуществом генеративного подхода стало перераспределение потоков посетителей: фудкорт оказался расположен между двумя основными маршрутами перемещения, в то время как при ручной планировке он пересекал только один. Аналогичное решение применимо и к ивент-пространству, которое в

генеративном варианте стало своеобразным ядром маршрутов и может выступать в качестве архитектурного "магнита", фокусирующего движение внутри здания.

Таким образом, генеративное зонирование обеспечило не только сохранение базовой логики взаимодействия функций и потоков, но и выявило

новые, рациональные сценарии размещения, недоступные в рамках ручного проектирования. Это подтверждает перспективность использования генеративного дизайна как инструмента быстрого, гибкого и экономически эффективного зонирования при реконструкции зданий.

Таблица 2. Сводные данные результатов генерации и ручного метода
Table 2. Summary of the results of the generation and manual method

Название функции/зоны	Ручное			Генерация		
	Площадь, м ²	%	Поток, млн руб в год	Площадь, м ²	%	Поток, млн руб в год
Ивент-пространство (ИП)	1192	21	74,47	1349	24	84,31
Фудкорт (ФК)	1547	28	123,73	1636	29	130,93
Лекторий (ЛЕ)	733	13	29,32	410	8	16,4
Студии и мастерские с естественным освещением от окон (СМО)	448	8	25,75	829	15	47,7
Студии и мастерские без естественного освещения (СМБ)	865	16	49,76	554	10	31,88
Офис администрации (ОА)	123	3	-	133	3	-
Загрузка-разгрузка (ЗР)	33	1	-	34	1	-
Итого:	4941	90	303,04	4945	90	311,25

Дополнительно проведено количественное сравнение вариантов зонирования, представленное в таблице 2. Генеративный подход позволил достичь большей экономической эффективности: суммарный годовой поток по корпусу составил 311,25 млн руб., что на 8,4 млн руб. превышает аналогичный показатель ручного проектирования (303,04 млн руб.). Особенно заметна разница по функциям с высокой арендной отдачей: ивент-пространство и фудкорт в генеративном варианте заняли больше площади, при этом расположившись более оптимально — между основными потоками, что теоретически увеличивает проходимость и привлекательность этих зон.

Лекторий и офис администрации незначительно снизились по площади в генеративной версии, но остались в допустимых границах. Это свидетельствует о способности алгоритма перераспределять ресурсы в пользу более доходных функций без ущерба логике размещения. Отдельное внимание заслуживает перераспределение студий и мастерских: при сохранении общего процентного соотношения, генеративная схема более точно разделяет их по освещённости, вынося затемнённые мастерские вглубь корпуса, освобождая освещённые зоны для функций, требующих инсоляции.

На графических схемах зонирования также заметно, что в ручном варианте планировка более линейна и осевая, тогда как генеративный результат демонстрирует ячеистую структуру с более равномерным распределением площадей. Потоки посетителей в генеративной версии обтекают

ключевые функции, усиливая их взаимодействие, в отличие от более прямолинейного маршрута в ручной версии.

Таким образом, табличные и графические данные подтверждают, что генеративный подход не только воспроизводит архитектурную логику, но и позволяет оптимизировать функциональное наполнение здания с точки зрения экономической эффективности и использования пространства. Полученные различия при сохранении архитектурной целостности подтверждают применимость алгоритма как реального инструмента в предпроектной практике.

Инвестиционная привлекательность. Чистая приведённая стоимость (NPV, Net Present Value) — это один из ключевых показателей оценки экономической эффективности проекта. Он позволяет понять, насколько выгодным окажется вложение с учётом временной стоимости денег. Идея заключается в том, чтобы привести все будущие денежные потоки к текущему моменту времени через дисконтирование, а затем вычесть из них первоначальные инвестиции. Если итоговая сумма положительна, проект считается финансово оправданным. Метод широко используется в инвестиционном анализе, так как даёт наглядное представление о потенциальной доходности проекта.

$$NPV = \sum_{k=1}^n \frac{P_k}{(1+i)^k} - IC,$$

где

P_k — величины денежных потоков в течение n лет
 IC — величины первоначальных инвестиций
 i — ставка дисконтирования

В контексте архитектурного или градостроительного проектирования эта формула может использоваться для оценки жизнеспособности концепции — например, при приспособлении существующего здания под новые функции. Мы можем взять прогнозируемые доходы от сдачи площадей в аренду, от коммерческих функций или мероприятий, распределённые по годам, и учесть затраты на реконструкцию и запуск. Применяя NPV, мы получаем возможность сравнить разные сценарии освоения или функционального зонирования не только с точки зрения архитектуры, но и с позиции финансовой устойчивости, выбирая наиболее оправданную стратегию развития.

В расчётах принята ставка дисконтирования на уровне 10% как усреднённое значение, характерное для проектов в сфере реконструкции и адаптивного повторного использования недвижимости. Такой уровень доходности отражает совокупность инвестиционных рисков, инфляционного давления и альтернативной стоимости капитала. Объём первоначальных инвестиций в расчётах принят условно на уровне 1 млрд рублей. Это приближённая оценка, основанная на усреднённых

затратах на реконструкцию объектов сопоставимой площади и сложности, включая строительные работы, инженерные системы и базовую отделку. Приблизительная стоимость 1 м² в таких проектах может составлять от 180 до 220 тыс. рублей, что при общей площади порядка 5700 м² даёт ориентировочную сумму около 1 млрд рублей. В качестве расчётного горизонта анализа (срок реализации) принят период в 5 лет, что обусловлено характером рассматриваемого проекта и предполагаемой продолжительностью его активной эксплуатации без существенных изменений в функциональной структуре.

Ставка дисконтирования, объём первоначальных инвестиций, срок реализации выбраны ориентировочно и единообразно для обоих методов: ручной и генеративный, что позволяет провести корректную сравнительную оценку. Поскольку все сценарии рассматриваются в одинаковых исходных условиях, абсолютные значения не оказывают влияния на итоговые выводы — существенна лишь относительная разница между ними.

Ручной

Период	Инвестиции	CF (Прибыль)	Сальдо денежных потоков	Чистые денежные потоки	NPV
1	1000	0	-1000,00	0,00	-1000,00
2	0	303,04	-696,96	250,45	-749,55
3	0	303,04	-393,92	227,68	-521,88
4	0	303,04	-90,88	206,98	-314,89
5	0	303,04	212,16	188,16	-126,73
6	0	303,04	515,20	171,06	44,33
7	0	303,04	818,24	155,51	199,83

Генеративный

Период	Инвестиции	CF (Прибыль)	Сальдо денежных потоков	Чистые денежные потоки	NPV
1	1000	0	-1000,00	0,00	-1000,00
2	0	311,25	-688,75	257,23	-742,77
3	0	311,25	-377,50	233,85	-508,92
4	0	311,25	-66,25	212,59	-296,33
5	0	311,25	245,00	193,26	-103,07
6	0	311,25	556,25	175,69	72,62
7	0	311,25	867,50	159,72	232,34

Рис. 15. Нахождение NPV
Fig. 15. Finding NPV

Сравнительный анализ показал, что оба метода — ручной и генеративный — выходят на положительное значение NPV к шестому году реализации. Однако генеративный вариант демонстрирует более стабильную динамику возврата инвестиций и в итоге формирует большую накопленную приведённую стоимость. К седьмому году NPV по генеративному сценарию составляет 232,34 млн рублей, тогда как по ручному — 199,83 млн. При равных исходных условиях и сроках реализации генеративный подход показывает более

высокую эффективность, что делает его предпочтительным в контексте принятия проектных решений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование подтвердило применимость генеративного дизайна как эффективного инструмента для предпроектного функционального зонирования зданий промышленного наследия, в частности корпусов

зального типа. Разработанная методика позволила учесть сложный комплекс факторов: освещённость, ориентацию по фасадам, логику потоков посетителей и экономические параметры функций, затем на их основе сгенерировать решение по функциональному зонированию, соответствующие архитектурным и эксплуатационным требованиям. Сравнение с ручным проектированием показало, что генеративный подход обеспечивает как сохранение логики пространственной организации, так и выявление новых, более выгодных сценариев размещения функций, повышающих экономическую эффективность использования здания. Итоговая годовая прибыль в варианте генеративного зонирования превысила результат ручного проектирования на 8,4 млн рублей, а оптимизация потоков и рациональное распределение функций усилили внутренние связи корпуса.

Таким образом, в ходе работы сделаны следующие выводы:

— генеративный дизайн применим для задач предпроектного анализа при адаптивном повторном использовании промышленных зданий;

— методика позволяет учитывать комплекс пространственных, архитектурных и экономических параметров в едином процессе генерации;

— генеративный подход обеспечивает получение сопоставимых или более эффективных решений по сравнению с традиционным проектированием при существенно меньших временных затратах;

— инструмент позволяет не только воспроизводить логические связи между функциями, но и предлагать новые сценарии, оптимальные по совокупности критериев;

— предложенная методика требует минимальной адаптации для применения к другим объектам аналогичной типологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Егоров М. В. Этапы развития промышленной архитектуры. Кризис типологии промышленной архитектуры // *Инновационная наука*. 2022. №5-2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/etapy-razvitiya-promyshlennoy-arhitektury-krizis-tipologii-promyshlennoy-arhitektury> (дата обращения: 11.05.2025).

2 Reconstruction of the gray belt objects based on energy efficiency clusters / L. Talipova, E. Shonina, K. Strelets, S. Lapteva // *E3S Web of Conferences* : 2018 International Science Conference on Business Technologies for Sustainable Urban Development, spbwosce 2018, St. Petersburg, 10–12 декабря 2018 года. Vol. 110. – St. Petersburg: EDP Sciences, 2019. – P. 01021. – DOI 10.1051/e3sconf/201911001021

3 Strategies for redevelopment of gray belt objects on the basis of neural networks / E. D. Kosyakov, L. V. Talipova, M. A. Romanovich [et al.] // *Construction of Unique Buildings and Structures*. – 2018. – No. 7(70). –

P. 31–42. – DOI 10.18720/CUBS.70.3

4 Talipova, L. Methods for converting industrial zones / L. Talipova, E. Kosyakov, I. Polyakova // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Khabarovsk, 10–13 апреля 2017 года. Vol. 90. – Khabarovsk: Institute of Physics Publishing, 2017

5 Салех Мария Сальвановна Внедрение цифровых методов на различных этапах архитектурного проектирования // *АМИТ*. 2021. №1 (54). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vnedrenie-tsifrovyyh-metodov-na-razlichnyh-etapah-arhitekturnogo-proektirovaniya> (дата обращения: 05.05.2025).

6 Лаушкина Анастасия Александровна, Басов Олег Олегович Применение методов генеративного дизайна с использованием мультимодальных данных в сфере архитектуры и градостроительства // *Научный результат. Информационные технологии*. 2021. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-metodov-generativnogo-dizayna-s-ispolzovaniem-multimodalnyh-dannyh-v-sfere-arhitektury-i-gradostroitelstva> (дата обращения: 05.05.2025).

7 Serdar S.E., Kaya M.E. Generative landscape modeling in urban open space design: an experimental approach // *Proceedings of Digital Landscape Architecture Conference 2019*. – 2019. – P. 150–157. – URL: https://www.dla-conference.com/wp-content/uploads/2019/06/DLA19_05-24_1500_Serdar_Modelling-Urban-Open-Space.pdf (дата обращения: 04.05.2025).

8 Комарова А. А., Пыхтюк С. В., Чернышов Д. А., Дымченко М. Е. Образование архитектурной формы с применением алгоритмических методов // *ИВД*. 2019. №8 (59). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obrazovanie-arhitekturnoy-formy-s-primeneniem-algoritmicheskikh-metodov> (дата обращения: 05.05.2025).

9 Gunagama M. G. Generative algorithms in alternative design exploration // *SHS Web of Conferences*. – 2018. – Vol. 41. – Art. 05003. – *Proceedings of eduarchsia* 2017. – DOI: 10.1051/shsconf/20184105003. – URL: <https://doi.org/10.1051/shsconf/20184105003> (дата обращения: 11.05.2025)

10 Nagy D., Lau D., Locke J., Lee B., Weber N., Schlueter A. Project Discover: an application of generative design for architectural space planning // *Autodesk Research*. – 2017. – 14 p. – URL: <https://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/research/publications-assets/pdf/project-discover-an-application.pdf> (дата обращения: 11.05.2025)

11 Li Z., Li S., Hinchcliffe G., Maitless N., Birbilis N. Automated architectural space layout planning using a physics-inspired generative design framework // *arxiv preprint arxiv:2406.14840*. – 2024. – 25 p. – URL: <https://arxiv.org/abs/2406.14840> (дата обращения: 11.05.2025)

12 Johan R., Chernyavsky M., Fabbri A., Madrazo L., Melenhorst M. Building intelligence through generative design: structural analysis and optimisation informed by material performance // *Proceedings of the*

24th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2019). – 2019. – P. 895–904. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/333104509> (дата обращения: 04.05.2025).

13 Голикова, Я. А. Применение генеративного дизайна при расчете параметров солнечного воздействия / Я. А. Голикова, С. В. Киселев, Л. В. Талипова // Вестник гражданских инженеров. – 2023. – № 3(98). – С. 77–87. – DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-3-77-87

14 Dorta T., Kinayoglu G., Hoffmann M. Performance-based generative design: an investigation of the integration of performance simulation and parametric design tools // Proceedings of the 100th ACSA Annual Meeting. – 2012. – P. 257–265. – URL: <https://www.acsa-arch.org/proceedings/Annual%20Meeting%20Proceedings/ACSA.AM.100/ACSA.AM.100.33.pdf> (дата обращения: 04.05.2025).

15 Бжахов М. И., Ефимова М. М., Журтов А. В. Алгоритмическое проектирование в архитектуре // ИВД. 2018. №2 (49). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algorithmicheskoe-proektirovanie-v-arhitekture> (дата обращения: 05.05.2025).

16 Lee Ch., Shin S., Issa R. R. A. Multi-objective optimization of a free-form surface based on generative designs // Proceedings of the 18th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE 2020) / eds. Eduardo Toledo Santos, Sergio Scheer. – Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 127. – Springer, Cham, 2021. – P. 1252–1261. – DOI: 10.1007/978-3-030-51295-8_90

17 Boon C., Griffin C., Papaefthimious N., Ross J., Storey K. Optimizing spatial adjacencies using evolutionary parametric tools: using Grasshopper and Galapagos to analyze, visualize, and improve complex architectural programming // Perkins+Will Research Journal. – 2015. – Vol. 07(02). – P. 25–37. – URL: https://www.briqbase.org/sites/default/files/PWRJ_Vol_0702_02_Optimizing_Spatial_Adjacencies_Using_Evolutionary_Parametric_Tools.pdf (дата обращения: 11.05.2025)

18 Birkemo A. S., Samarakoon S. M. K. Application of generative design for structural optimization at the conceptual design phase // Building Information Modelling (BIM) in Design, Construction and Operations IV. – 2021. – P. 139–150. – URL: <https://uis.brage.unit.no/uis-xmlui/bitstream/handle/11250/3057274/BIM21012FU1.pdf?isallowed=y&sequence=1> (дата обращения: 11.05.2025)

REFERENCES

1 Egorov, M. V. “Stages of Industrial Architecture Development. The Crisis of Industrial Architecture Typology.” *Innovative Science*, 2022, no. 5-2. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/etapy-razvitiya-promyshlennoy-arhitektury-krizis-tipologii-promyshlennoy-arhitektury> (Accessed: 11 May 2025).

2 Reconstruction of the Gray Belt Objects Based on Energy Efficiency Clusters / L. Talipova, E. Shonina, K. Strelets, S. Lapteva // E3S Web of Conferences: 2018 International Science Conference on Business Technologies for Sustainable Urban Development, spbwosce 2018, St. Petersburg, December 10–12, 2018. Vol. 110. – St. Petersburg: EDP Sciences, 2019. – P. 01021. – DOI 10.1051/e3sconf/201911001021

3 Strategies for redevelopment of gray belt objects on the basis of neural networks / E. D. Kosyakov, L. V. Talipova, M. A. Romanovich [et al.] // Construction of Unique Buildings and Structures. – 2018. – No. 7(70). – P. 31–42. – DOI 10.18720/CUBS.70.3

4 Talipova, L. Methods for converting industrial zones / L. Talipova, E. Kosyakov, I. Polyakova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Khabarovsk, April 10–13, 2017. Vol. 90. – Khabarovsk: Institute of Physics Publishing, 2017

5 Salekh Maria Salvanovna implementation of digital methods at various stages of architectural design // AMIT. 2021. No. 1 (54). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vnedrenie-tsifrovyyh-metodov-na-razlichnyh-etapah-arhitekturnogo-proektirovaniya> (date of access: 05.05.2025).

6 Laushkina Anastasia Aleksandrovna, Basov Oleg Olegovich Application of generative design methods using multimodal data in the field of architecture and urban planning // research result. *Information Technologies*. 2021. No. 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-metodov-generativnogo-dizayna-s-ispolzovaniem-multimodalnyh-dannyh-v-sfere-arhitektury-i-gradostroitelstva> (accessed: 05.05.2025).

7 Serdar S.E., Kaya M.E. Generative landscape modeling in urban open space design: an experimental approach // Proceedings of Digital Landscape Architecture Conference 2019. – 2019. – P. 150–157. – URL: https://www.dla-conference.com/wp-content/uploads/2019/06/DLA19_05-24_1500_Serdar_Modelling-Urban-Open-Space.pdf (date accessed: 04.05.2025).

8 Komarova A. A., Pykhtyuk S. V., Chernyshov D. A., Dymchenko M. E. Formation of architectural form using algorithmic methods // IVD. 2019. No. 8 (59). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obrazovanie-arhitekturnoy-formy-s-primeneniem-algoritmicheskikh-metodov> (date accessed: 05.05.2025).

9 Gunagama M. G. Generative algorithms in alternative design exploration // SHS Web of Conferences. – 2018. – Vol. 41. – Art. 05003. – Proceedings of eduarchsia 2017. – DOI: 10.1051/shsconf/20184105003. – URL: <https://doi.org/10.1051/shsconf/20184105003> (access date: 05/11/2025)

10 Nagy D., Lau D., Locke J., Lee B., Weber N., Schlueter A. Project Discover: an application of generative design for architectural space planning // Autodesk Research. – 2017. – 14 p. – URL: <https://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/research/publications-assets/pdf/project-discover-an-application.pdf> (access date: 05/11/2025)

11 Li Z., Li S., Hinchcliffe G., Maitless N., Birbilis

N. Automated architectural space layout planning using a physics-inspired generative design framework // arxiv preprint arxiv:2406.14840. – 2024. – 25 p. – URL: <https://arxiv.org/abs/2406.14840> (access date: 05/11/2025)

12 Johan R., Chernyavsky M., Fabbri A., Madrazo L., Melenhorst M. Building intelligence through generative design: structural analysis and optimization informed by material performance // Proceedings of the 24th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2019). – 2019. – P. 895–904. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/333104509> (access date: 05/04/2025).

13 Golikova, Ya. A. Application of generative design in calculating solar exposure parameters / Ya. A. Golikova, S. V. Kiselev, L. V. Talipova // Bulletin of civil engineers. - 2023. - No. 3 (98). - P. 77-87. - DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-3-77-87

14 Dorta T., Kinayoglu G., Hoffmann M. Performance-based generative design: an investigation of the integration of performance simulation and parametric design tools // Proceedings of the 100th ACSA Annual Meeting. - 2012. - P. 257-265. – URL: <https://www.acsa-arch.org/proceedings/Annual%20Meeting%20Proceedings/ACSA.AM.100/ACSA.AM.100.33.pdf> (access date: 05/04/2025).

15 Bzhakhov M.I., Efimova M.M., Zhurtov A.V. Algorithmic design in architecture // IVD. 2018. No. 2 (49). URL:

<https://cyberleninka.ru/article/n/algorithmicheskoe-proektirovanie-v-arhitekture> (date of access: 05/05/2025).

16 Lee Ch., Shin S., Issa R. R. A. Multi-objective optimization of a free-form surface based on generative designs // Proceedings of the 18th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE 2020) / eds. Eduardo Toledo Santos, Sergio Scheer. – Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 127. – Springer, Cham, 2021. – P. 1252–1261. – DOI: 10.1007/978-3-030-51295-8_90

17 Boon C., Griffin C., Papaefthimious N., Ross J., Storey K. Optimizing spatial adjacencies using evolutionary parametric tools: using Grasshopper and Galapagos to analyze, visualize, and improve complex architectural programming // Perkins+Will Research Journal. – 2015. – Vol. 07(02). – P. 25–37. – URL: https://www.brikbase.org/sites/default/files/PWRJ_Vol_0702_02_Optimizing_Spatial_Adjacencies_Using_Evolutionary_Parametric_Tools.pdf (дата обращения: 11.05.2025)

18 Birkemo A. S., Samarakoon S. M. K. Application of generative design for structural optimization at the conceptual design phase // Building Information Modelling (BIM) in Design, Construction and Operations IV. – 2021. – P. 139–150. – URL: <https://uis.brage.unit.no/uis-xmlui/bitstream/handle/11250/3057274/BIM21012FU1.pdf?Isallowed=y&sequence=1> (дата обращения: 11.05.2025)

THE POTENTIAL OF GENERATIVE DESIGN IN THE ADAPTIVE REUSE OF INDUSTRIAL ARCHITECTURE

Kozodaeva V.S., Bardina G.A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)
29 Politekhnicheskaya St., St. Petersburg, 195251
e-mail: valeriia.kozodoy@mail.ru

Abstract: This article examines the use of generative design for the functional zoning of industrial heritage sites for adaptive reuse. A method for parameterizing an existing building and the requirements for its functions is proposed using Rhino, Grasshopper, Ladybug, and Galapagos. A comparison of manual and generative approaches is performed using a hall-type industrial building as an example.

Subject of the study: Functional zoning of industrial heritage sites using generative design.

Materials and methods: Digital model of a hall-type industrial building, parametric modeling in Rhino and Grasshopper, illumination analysis in Ladybug, and optimization of zoning options using Galapagos.

Results: A method for generative functional zoning was developed and tested. The generative approach demonstrated higher cost effectiveness compared to manual design and allowed for the identification of additional space use scenarios.

Conclusions: Generative design can be effectively applied at the pre-project analysis stage during the reconstruction of industrial heritage sites, reducing labor costs and improving the quality of decisions made.

Key words: reconstruction, renovation, adaptive reuse, generative design, industrial architecture, cultural heritage sites.