



Научная статья

<https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-155-2-109-127>

Алгоритмическое проектирование как методологическая основа оптимизации инсоляции и ветровых потоков на этапе эскизного архитектурного формообразования

М.Шегенова^{1*} , Г.Мауленова¹ , А.Султанова² 

¹*Казахский национальный исследовательский технический университет
им. К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан*

²*Российский университет дружбы народов, Москва, Россия*

*E mail: shegenova.M@stud.satbayev.university, g.maulenova@satbayev.university,
sultanova_a@rudn.ru*

Аннотация. Современная архитектурная практика сталкивается с необходимостью учета климатических факторов уже на ранних стадиях проектирования, когда закладываются ключевые параметры пространственной, функциональной и экологической эффективности будущего объекта. Предметом настоящего исследования выступает методологический потенциал алгоритмического проектирования как инструмента трансформации эскизного проектирования в аналитически обоснованный процесс. Исследование носит теоретико-методологический характер и базируется на сравнительном анализе инструментальных платформ, обобщении подходов к климатическому моделированию и рассмотрении принципов многокритериальной оптимизации в архитектуре. В результате предложена концептуальная модель итеративно-интегрированного проектирования, в которой анализ инсоляции и аэрации рассматривается как активный фактор формообразования, а выбор решений осуществляется в пространстве компромиссов между климатическими, энергетическими, функциональными и архитектурно-художественными критериями. Обосновано, что алгоритмическое проектирование может рассматриваться как методологическая основа для перехода к «вычислительному эскизированию», обеспечивающему более высокий уровень согласованности проектных решений с требованиями устойчивого и климатически адаптивного проектирования.

Ключевые слова: алгоритмическое проектирование, вычислительное проектирование, инсоляция, ветровые потоки, оптимизация, эскизное проектирование, Dynamo, Grasshopper, BIM

Received 20.04.2026. Revised 20.05.2026. Accepted 12.06.2026. Available online 30.03.2026

* the correspondence author

Введение

Обоснование выбора темы и актуальность исследования обусловлены трансформацией современной архитектурной практики, которая все в большей степени ориентируется на принципы устойчивого развития, климатической адаптации и междисциплинарной координации проектных решений. Одним из ключевых противоречий раннего этапа проектирования остается несоответствие между необходимостью учета большого числа взаимосвязанных технических, экологических и климатических параметров и преобладанием интуитивно-художественных методов формообразования, характерных для традиционного эскизирования. В этих условиях возрастает потребность в инструментах, способных интегрировать аналитические процедуры в сам процесс поиска архитектурной формы, не подменяя творческое решение, а дополняя его объективными данными.

Актуальность темы усиливается тем, что именно ранние проектные решения во многом определяют последующие показатели энергоэффективности, инсоляционного режима, аэрации и эксплуатационного качества здания. В связи с этим алгоритмическое проектирование рассматривается не просто как цифровой инструмент, а как новая логика организации проектного процесса, предполагающая переход от линейной модели «эскиз – анализ – корректировка» к итеративно-интегрированному подходу, в котором анализ становится частью самого формообразования.

Дополнительную актуальность исследованию придает тот факт, что здания продолжают оставаться одним из крупнейших источников энергопотребления и связанных с ним выбросов углекислого газа. В современной научной литературе подчеркивается, что на здания приходится около 36% мирового конечного энергопотребления и почти 39% энергетически обусловленных выбросов CO₂, что делает ранние проектные решения критически значимыми с точки зрения устойчивого развития. В этих условиях переход к алгоритмически поддерживаемому проектированию приобретает не только технологическое, но и экологическое значение, поскольку позволяет включать вопросы энергоэффективности в логику формообразования уже на стадии концепции [1].

Настоящая работа представляет собой теоретико-методологическое исследование, направленное на системную разработку и научное обоснование целостной модели применения алгоритмического проектирования для климатической оптимизации на стадии эскизного формообразования. В отличие от прикладных исследований, ориентированных на апробацию конкретного проектного кейса, данная статья сосредоточена на концептуализации принципов, инструментов и логики интеграции алгоритмических методов в ранние стадии архитектурного проектирования.

При этом важно подчеркнуть, что BIM в современном понимании представляет собой не просто программный инструмент трехмерного моделирования, а более широкую процессную парадигму, охватывающую координацию данных, взаимодействие участников проекта и сопровождение объекта на протяжении жизненного цикла. В таком контексте интеграция алгоритмического проектирования с BIM означает не добавление еще одного цифрового инструмента, а изменение самой логики принятия проектных решений, при которой аналитические данные становятся частью единого информационного контура проектирования [2].

Научная новизна исследования заключается в синтезе разрозненных подходов – параметрического моделирования, динамического анализа инсоляции, упрощенного моделирования ветровых потоков, многокритериальной оптимизации и BIM-интеграции –

в единую методологическую модель итеративно-интегрированного проектного процесса. Существенным элементом новизны является также акцент на ограничениях алгоритмического подхода и на определении кураторской роли архитектора в принятии проектных решений.

Целью исследования является разработка и теоретическое обоснование методологии применения алгоритмического проектирования в средах Grasshopper и Dynamo для учета инсоляционного и ветрового режимов зданий на этапе эскизного проектирования.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи исследования:

1. Провести сравнительный анализ инструментальных платформ Grasshopper и Dynamo в контексте их потенциала для климатического анализа.
2. Раскрыть теоретико-методологические основы интеграции анализа инсоляции и упрощенного CFD-моделирования в процесс архитектурного формообразования.
3. Разработать концептуальную модель многокритериальной оптимизации архитектурной формы с учетом инсоляции, ветровых потоков и экологических критериев.
4. Определить перспективы интеграции алгоритмического проектирования с BIM, искусственным интеллектом и технологиями IoT.

Объект исследования – процесс эскизного архитектурного проектирования.

Предмет исследования – методология применения алгоритмического проектирования для учета и оптимизации инсоляции и ветровых потоков на ранних стадиях архитектурного формообразования.

Обзор литературы.

Существенный вклад в переосмысление самой логики инсоляционного анализа внесли Перейра и Сильва, показавшие, что традиционная ориентация на фиксированную продолжительность инсоляции не отражает реального воздействия солнечной радиации на качество среды. Один и тот же показатель продолжительности солнечного освещения может соответствовать различной дозе радиации в зависимости от времени года, атмосферных условий, ориентации фасадов и характера окружающих затенений. В связи с этим исследователи предлагают опираться не только на продолжительность солнечного воздействия, но и на различие «желательной» и «нежелательной» радиации, что особенно важно для климатически адаптивного проектирования [3]. Концепция солнечного конверта в этом контексте выступает как один из наиболее показательных примеров перевода климатического анализа в язык формообразующих ограничений. В классической интерпретации солнечный конверт определяется как предельный объем, который может занять здание при сохранении доступа инсоляции к соседним участкам. Важно, что данная концепция рассматривается не как универсальная формула, а как часть более широкой системы градостроительного и архитектурного регулирования, где инсоляционные требования должны быть встроены в общий баланс проектных целей, а не абсолютизированы [3].

Современные исследования, включая работы Квока и др. [4], демонстрируют растущий интерес к интеграции мультizonального CFD-анализа с инсоляционным моделированием для повышения точности прогнозирования микроклимата. Вопросы устойчивости активно разрабатываются в контексте жизненного цикла материалов (LCA), где подход Гомеса де Косара и др. [5] показывает эффективность интеграции генеративных алгоритмов с базами данных для снижения углеродного следа.

Значительный вклад в развитие инструментария вносят исследования по интеграции BIM и параметрических сред [6, 7], а также по автоматизации процессов оценки энергоэффективности и комфорта [8, 9, 10]. Работы по применению генетических алгоритмов для многокритериальной оптимизации в архитектуре [11], а также исследования, посвященные использованию методов машинного обучения для прогнозирования солнечной радиации и энергетических показателей зданий [12, 13], формируют теоретический фундамент для следующего этапа эволюции АП – генеративного дизайна.

Отдельного внимания заслуживают исследования, посвященные интеграции генеративных алгоритмов и LCA в BIM-среду на ранней стадии проектирования. Как показывает работа Гомеса де Косара и соавт., в существующей практике автоматизация и генеративный поиск нередко внедряются слишком поздно, когда основные решения о форме, конструкции и материальности уже во многом зафиксированы. Между тем именно начальная стадия проектирования обладает наибольшим потенциалом для экологической оптимизации, поскольку позволяет варьировать форму и состав ограждающих решений до того, как проект приобретает инерционную жесткость [5].

Однако анализ литературы выявляет пробел в исследованиях, связанный с недостаточной систематизацией комплексной методологии, которая бы объединила анализ инсоляции и ветровых потоков в единый, управляемый алгоритмами процесс эскизного формообразования, явно описывала теоретическую модель оптимизации и ее ограничения, в частности риск «переоптимизации» в ущерб архитектурной образности. Настоящее исследование направлено на восполнение этого пробела.

Методология

Методологическая основа исследования базируется на принципах алгоритмического и параметрического проектирования, интегрированных с подходами климатического анализа, BIM-моделирования и многокритериальной оптимизации. Исследование носит теоретико-методологический характер и направлено не на экспериментальную верификацию конкретного проектного решения, а на построение концептуальной модели применения алгоритмических инструментов для учета инсоляции и ветровых потоков на стадии эскизного проектирования.

Ключевой исследовательский вопрос формулируется следующим образом: каким образом алгоритмическое проектирование может быть системно встроено в процесс архитектурного формообразования для учета климатических факторов и повышения обоснованности проектных решений на ранних стадиях разработки?

В рамках исследования предлагается концептуальная модель итеративно-интегрированного проектирования, включающая следующие этапы:

1. Параметризация архитектурной формы

Геометрия здания описывается как функция набора переменных параметров, включающих габариты, ориентацию, углы наклона, коэффициент остекления, конфигурацию объемов и иные характеристики, влияющие на инсоляционный и аэродинамический режим объекта. Такой подход позволяет рассматривать архитектурную форму как изменяемую систему и формировать множество альтернативных решений в пределах заданного параметрического пространства. Выбор параметров, описывающих архитектурную форму, не является произвольным. В исследованиях, посвященных энергоэффективности и тепловому комфорту, неоднократно показано, что форма здания, его ориентация,

коэффициент остекления и пространственная конфигурация функциональных зон образуют взаимосвязанную систему факторов, определяющих как характер естественного освещения, так и тепловое поведение оболочки. Следовательно, именно эти параметры должны рассматриваться как приоритетные переменные в алгоритмически управляемом пространстве проектных решений [14].

2. Интеграция климатических данных

В модель вводятся климатические параметры, включая траектории движения солнца, погодные данные, характеристики ветрового режима, направления преобладающих потоков и иные показатели, обеспечивающие связь проектируемой формы с реальными условиями окружающей среды. За счет этого климатические факторы становятся не внешними ограничениями, а активными переменными архитектурного анализа.

3. Формирование целевых функций

Оптимизация архитектурной формы рассматривается как задача согласования нескольких целевых критериев: максимизации полезной инсоляции в холодный период, минимизации избыточной солнечной радиации в теплый период, улучшения ветрового режима в пешеходной зоне, а также снижения энергетической и экологической нагрузки, связанной с эксплуатацией и жизненным циклом здания.

4. Многокритериальная оптимизация

Поиск проектных решений интерпретируется через методы многокритериальной оптимизации, включая генетические алгоритмы, позволяющие формировать множество Парето-оптимальных альтернатив. В рамках такой логики оптимизация рассматривается не как поиск единственного наилучшего варианта, а как выявление области компромиссных решений, в которой улучшение одного показателя сопряжено с допустимым ухудшением другого.

Существенным направлением развития алгоритмического проектирования становится переход от реактивной экологической оценки к проактивному экологическому формообразованию. По данным Гомеса де Косара и соавт., интеграция эволюционных алгоритмов в BIM-модели позволяет не просто сравнивать уже подготовленные варианты, а автономно исследовать пространство решений и в режиме, близком к реальному времени, выявлять комбинации параметров, снижающие экологическое воздействие. Тем самым экологическая оценка перестает быть внешней процедурой контроля и становится частью логики проектного поиска [5].

В логике многокритериальной оптимизации ключевым понятием становится Парето-фронт, представляющий собой множество недоминируемых решений, в которых улучшение одного показателя возможно лишь ценой ухудшения другого. Для архитектурного проектирования это принципиально важно, поскольку задачи инсоляции, теплового комфорта, аэродинамики, материалоемкости и стоимости редко согласуются между собой без конфликта. Поэтому оптимизация в архитектуре должна пониматься не как поиск единственного «идеального» решения, а как структурирование пространства компромиссов, внутри которого архитектор осуществляет профессиональный выбор [11].

5. Интерпретация и отбор решений

Полученное множество альтернатив анализируется архитектором, который выступает в роли куратора процесса и осуществляет выбор проектного решения на основе не только количественных показателей, но и архитектурно-художественных, функциональных, контекстуальных и композиционных факторов. Тем самым вычислительные методы

рассматриваются как средство расширения пространства поиска, а не как замена профессионального суждения.

В рамках предложенной методологии используются две взаимодополняющие платформы: Grasshopper – для генерации геометрии и проведения интегрированного климатического анализа на ранних стадиях, и Dynamo – для последующей параметрической настройки, координации и аналитической работы в BIM-среде.

Ограничения методологии

Следует подчеркнуть, что предложенная модель носит концептуальный характер и предназначена прежде всего для теоретического описания и структурирования процесса климатически ориентированного алгоритмического проектирования. Рассматриваемые в статье подходы к анализу инсоляции и ветровых потоков на ранних стадиях проектирования основываются на упрощенных расчетных представлениях и не подменяют собой детальные инженерные расчеты, выполняемые на последующих стадиях разработки проекта. Кроме того, алгоритмическая оптимизация не должна рассматриваться как автономный механизм принятия архитектурного решения, поскольку существует риск переоптимизации, при котором количественные показатели начинают доминировать над художественными, функциональными и контекстуальными качествами архитектуры. В связи с этим в предлагаемой модели ключевая роль сохраняется за архитектором, который интерпретирует результаты анализа и осуществляет итоговый отбор решений.

Следует учитывать, что ранняя стадия проектирования неизбежно связана с высокой степенью неопределенности. Как отмечается в исследованиях по BIM-ориентированному энергетическому моделированию, точный прогноз энергетических характеристик здания на начальном этапе затруднен в силу сложности самой системы здания и ограниченности исходных данных. Поэтому результаты ранних климатических и энергетических оценок следует трактовать не как окончательные инженерные значения, а как инструмент направленного сравнения альтернатив и уточнения проектной логики. В этом заключается методологическая ценность алгоритмического подхода: он повышает качество предварительного выбора, не отменяя необходимости дальнейшей детальной верификации [13].

Результаты и Обсуждение

1. Теоретико-методологические основы алгоритмического проектирования в архитектуре

Эволюция архитектурного метода от параметризма к вычислительному проектированию сопровождается изменением самой логики работы архитектора. Алгоритмическое проектирование становится инструментом работы не столько с конечной формой, сколько с правилами ее генерации, основанными на взаимосвязи параметров, ограничений и критериев оценки. В этом контексте проектирование смещается от модели «дизайна объекта» к модели «дизайна поведения», в которой архитектурная форма рассматривается как ответ на динамические воздействия окружающей среды, включая солнечную радиацию, ветровые потоки и температурные условия.

Сравнительный анализ инструментальных платформ показывает (Таб.1), что Grasshopper и Dynamo занимают разные, но взаимосвязанные позиции в общем цифровом процессе проектирования. Grasshopper представляет собой наиболее гибкую среду для

свободного исследования геометрических систем и раннего концептуального формообразования.

Таблица 1. Сравнительный анализ возможностей Grasshopper и Dynamo для задач климатического анализа на этапе эскизного проектирования.

Критерий сравнения	Grasshopper	Dynamo	Комментарий/Рекомендация по применению
Основная философия и цель	Свободное параметрическое моделирование и исследование формы. Идеален для генерации и изучения сложной, нестандартной геометрии.	Автоматизация и управление данными внутри BIM-модели. Ориентирован на интеграцию параметрических методов в информационное моделирование.	Grasshopper – для концептуального поиска и свободного формообразования. Dynamo – для оптимизации и анализа уже заданной BIM-модели.
Гибкость и глубина геометрического моделирования	Высокая. Ядро системы – работа с чистой геометрией (NURBS). Позволяет создавать любые формы с нуля, управляя их логикой построения.	Ограниченная. Работа ведется с BIM-элементами (стены, окна, крыши) и их параметрами. Создание сложной геометрии с нуля требует обходных путей или связи с другими пакетами.	Grasshopper – лучший выбор для алгоритмического «скульптуринга» формы под влиянием климатических данных.
Интеграция с BIM и сквозной процесс	Опосредованная. Экспорт геометрии в BIM-среды для дальнейшей разработки. Прямой двусторонней связи с данными BIM (например, спецификациями) нет.	Прямая и глубокая. Неотъемлемая часть Revit. Позволяет напрямую читать, модифицировать и создавать BIM-элементы, обеспечивая полную трассировку данных на всех этапах.	Dynamo – ключевой инструмент для BIM-сопровождения климатически оптимизированной формы на поздних стадиях эскиза и рабочем проектировании.
Анализ инсоляции и солнечной радиации	Отличная, через плагины (Ladybug). Позволяет проводить динамический анализ по часовым данным годовой погоды, строить «солнечные конверты», карты изолиний, диаграммы пути солнца.	Удовлетворительная, нативная и через пакеты. Имеет базовые инструменты для солнечных исследований. Для глубокого анализа требуются сторонние пакеты (например, Refinery + Insight), которые могут уступать Ladybug в гибкости.	Grasshopper (Ladybug) – неоспоримый лидер для комплексного и динамического инсоляционного анализа на этапе формообразования.

Моделирование ветровых потоков (CFD)	Хорошая, через плагины (Butterfly, др.). Позволяет запускать упрощенные симуляции (например, на основе OpenFOAM) для визуализации потоков вокруг зданий непосредственно в среде скетчинга.	Ограниченная. Прямые CFD-расчеты внутри Дупамо редки. Чаще используется для подготовки геометрии и данных для передачи в специализированные CFD-пакеты (Autodesk CFD, др.).	Grasshopper – для быстрой интегративной оценки аэрации в итеративный цикл. Дупамо – для подготовки и передачи данных в специализированный софт.
Многокритериальная оптимизация (MCO)	Отличная, через плагины (Octopus, Wallacei и др.). Прямая интеграция с генетическими алгоритмами (NSGA-II) для поиска Парето-фронта. Позволяет связать форму, инсоляцию, ветер и стоимость в одной модели.	Доступная, через Refinery и др. Позволяет проводить оптимизацию на основе параметров BIM-модели. Может быть менее гибкой в настройке сложных целевых функций, связанных с чистой геометрией.	Grasshopper – для комплексной генеративной оптимизации формы. Дупамо – для оптимизации параметров (WWR, ориентация, материалы) в уже утвержденной объемно-планировочной структуре.
Скорость освоения и входной порог	Высокий. Требуется понимание логики алгоритмов и работы с данными. Более крутая кривая обучения.	Средний. Более понятен для пользователей Revit, так как оперирует знакомыми объектами (уровни, стены). Логика визуального программирования схожа.	Для архитектора, владеющего Revit, начать работу с Дупамо может быть проще. Grasshopper требует больше времени на освоение, но дает большую свободу.
Итоговая рекомендация для этапа	Основной инструмент для раннего эскизного проектирования (концепт). Максимальная гибкость для итеративного поиска формы, напрямую «заточенной» под климатический анализ.	Основной инструмент для углубленного эскиза и перехода к BIM. Лучший выбор, когда форма в целом определена и требуется ее детализация, анализ и оптимизация в рамках BIM-парадигмы с учетом реальных конструкций и материалов.	Идеальный рабочий процесс: Генерация и первичная климатическая оптимизация формы в Grasshopper – экспорт/пересоздание базовой геометрии в Revit – детальная параметрическая настройка и анализ в Дупамо.

Примечание: составлено авторами на основе анализа научной литературы и практики применения платформ.

Благодаря развитой экосистеме плагинов она позволяет интегрировать климатический анализ непосредственно в процесс генерации архитектурной формы. Дупамо, в свою очередь, ориентирована на работу внутри BIM-среды и обеспечивает

параметрическое управление данными, объектами и аналитическими сценариями в рамках информационной модели здания.

Современные исследования микроклиматического архитектурного проектирования подтверждают, что связка Grasshopper и Dynamo целесообразна именно как взаимодополняющая система. Grasshopper обеспечивает гибкость параметрического моделирования и прямую связь с климатическими переменными, такими как солнечная радиация и ветровой режим, тогда как Dynamo усиливает BIM-компонент проектирования, позволяя насыщать модель данными и использовать их для дальнейшего анализа и координации. В результате климатические показатели перестают быть внешним фоном проектирования и включаются в саму логику генерации и уточнения архитектурной формы [7].

Таким образом, Grasshopper и Dynamo следует рассматривать не как конкурирующие, а как комплементарные инструменты. Первая платформа более уместна на стадии свободного концептуального поиска и генеративной оптимизации формы, тогда как вторая играет ключевую роль на этапе углубления эскиза, интеграции параметрических решений в BIM-модель и координации дальнейшего аналитического сопровождения проекта.

Интерфейсы обеих систем поддерживают использование Python-скриптов, что открывает возможности для создания сложных климатических граничных условий, обработки больших данных симуляций и реализации пользовательских алгоритмов оптимизации, делая передовые биоклиматические методики доступными для архитектора-практика.

2. Методология интеграции анализа инсоляции и ветровых потоков в процесс формообразования

Современный подход к оценке инсоляции существенно отличается от традиционной нормативной логики, основанной на проверке фиксированных временных показателей солнечного освещения. В рамках алгоритмического проектирования инсоляция рассматривается как динамический фактор, который может быть интегрирован в процесс генерации формы через анализ годовых циклов солнечной радиации, сезонных сценариев освещенности и пространственных ограничений, связанных с окружающей застройкой. Это позволяет интерпретировать инсоляцию не как внешнее ограничение, а как активный параметр формообразования.

Одним из ключевых инструментов такой интеграции становится концепция «солнечного конверта», задающая допустимые пределы объемно-пространственного решения с учетом сохранения нормативно и экологически обоснованного солнечного режима прилегающих территорий. Встраивание подобных расчетов в параметрическую модель создает возможность оперативно корректировать геометрию фасадов, глубину помещений, ориентацию объемов и коэффициент остекления в зависимости от климатических целей проекта.

Параллельно в процесс раннего формообразования включается анализ ветровых потоков, направленный на выявление зон дискомфорта, областей застоя воздуха и потенциальных аэродинамических конфликтов в городской среде. Даже при использовании упрощенных моделей такой анализ позволяет на концептуальном уровне принимать более обоснованные решения о взаиморасположении объемов, конфигурации открытых пространств, организации атриумов и формировании пешеходного микроклимата. Тем самым инсоляционный и ветровой анализ становятся

взаимосвязанными компонентами единой климатически ориентированной проектной логики (Рис.1).

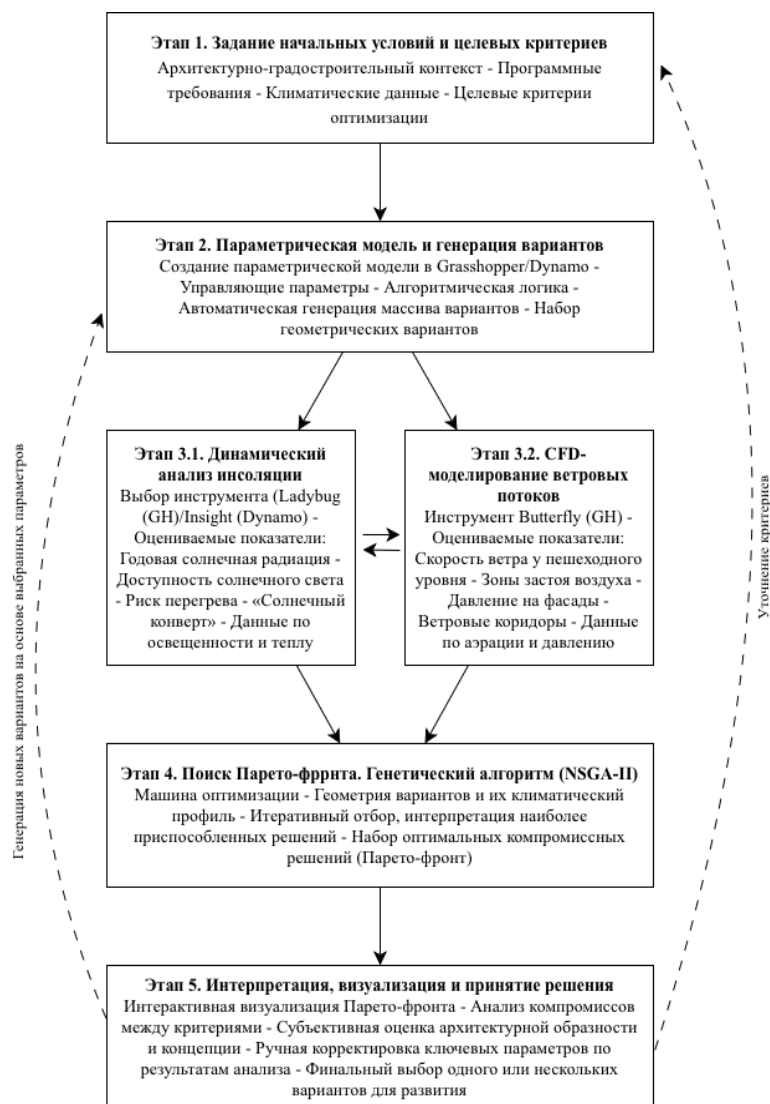


Рисунок 1. Схема итеративно-интегрированного алгоритмического проектирования с учетом климатических факторов на этапе эскизного формообразования.

Примечание: разработано авторами на основе [4, 5, 7, 11].

Дополнительным подтверждением продуктивности интегрированного подхода служат исследования, в которых солнечный анализ и BIM используются как основа для повышения достоверности CFD-моделирования. В частности, Квок и соавт. показали, что при моделировании многозональной внутренней среды учет солнечных теплопритоков, рассчитанных на основе геометрии, ориентации, материалов, местоположения и погодных данных, улучшает точность температурного прогноза. В этой схеме BIM выполняет не только функцию хранения геометрии, но и становится источником семантических данных, необходимых для формирования расчетной модели (Рис.2). Такой подход особенно важен для ранней стадии проектирования, где повышение точности возможно даже при

ограниченной исходной информации [4]. 3. Теоретическая модель процесса оптимизации и его ограничения

Теоретическая модель алгоритмической оптимизации в архитектуре исходит из того, что проектное решение должно рассматриваться как результат согласования нескольких, нередко противоречивых критериев. К ним относятся показатели полезной инсоляции, ограничения перегрева, параметры ветрового комфорта, энергетическая эффективность, экологические характеристики материалов и требования архитектурной выразительности. В этой связи принципиальное значение приобретает многокритериальная оптимизация, позволяющая анализировать не один «лучший» вариант, а множество альтернативных решений, находящихся в отношениях компромисса.

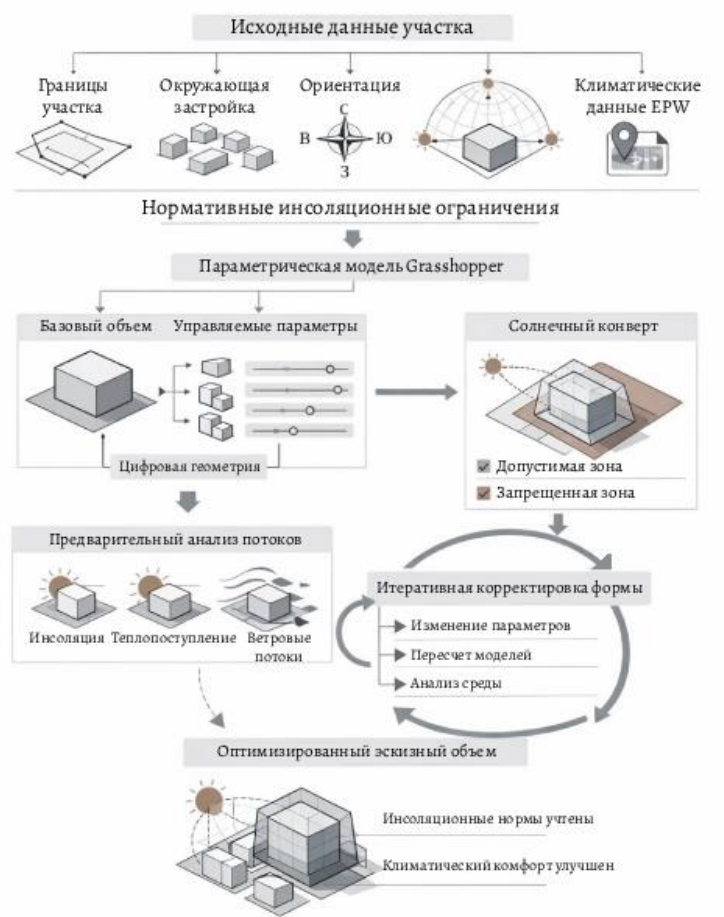


Рисунок 2. Схема построения солнечного конверта в параметрической модели с учетом климатических ограничений.

Примечание: разработано авторами на основе [3, 4].

Парето-фронт в данной логике выступает как теоретический инструмент интерпретации множества допустимых альтернатив, в рамках которого улучшение одного критерия сопровождается ухудшением другого. Такое представление особенно значимо для архитектурного проектирования, поскольку позволяет отказаться от иллюзии

единственно правильного решения и рассматривать форму как результат осмысленного выбора в пределах многомерного пространства параметров и ограничений (Рис.3).

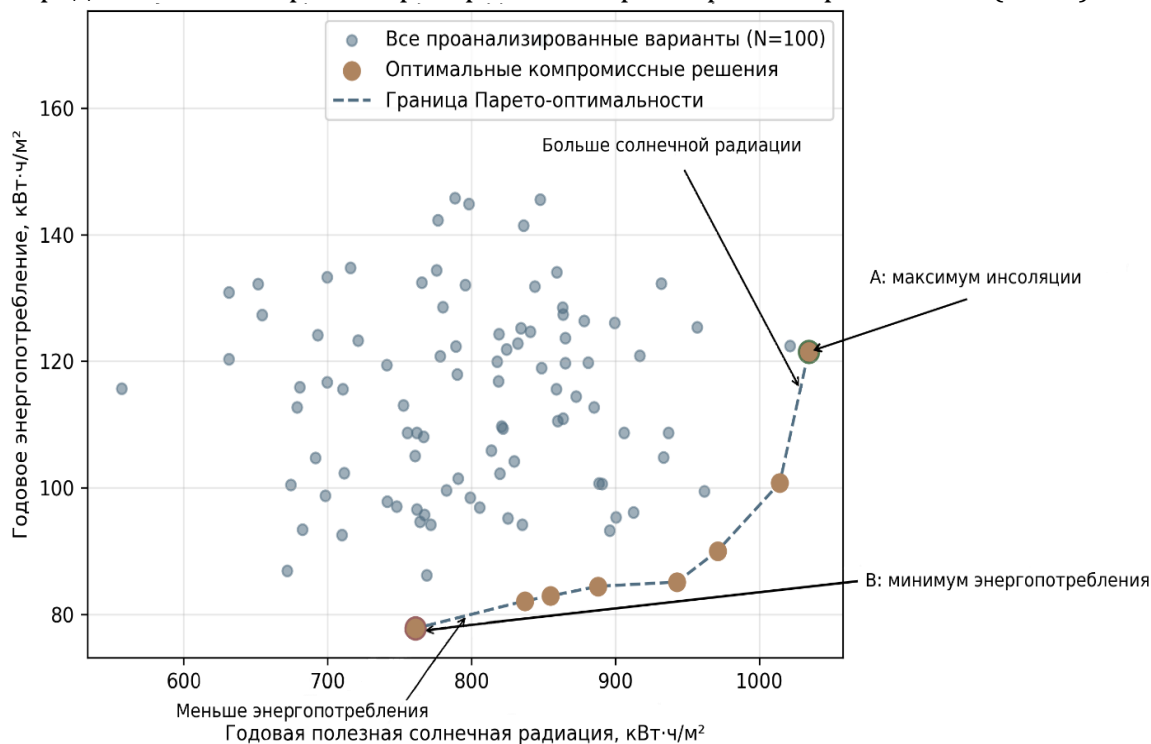


Рисунок 3. Схема Парето-оптимального выбора проектных решений в многокритериальном пространстве оценки.

Примечание: разработано авторами на основе [5, 11, 15].

В рамках предлагаемой методологической модели параметрическое проектирование рассматривается как способ описания архитектурной формы через систему управляемых параметров, определяющих геометрию, ориентацию, конфигурацию объемов и характеристики ограждающих конструкций. Использование многокритериальной оптимизации в данном контексте позволяет концептуально представить пространство проектных решений как множество альтернатив, различающихся по степени соответствия климатическим, энергетическим и композиционным требованиям.

При этом принципиально важно подчеркнуть, что алгоритмическая оптимизация не устраняет профессиональную роль архитектора. Напротив, она усиливает ее, переводя принятие решений из режима интуитивного перебора в режим аналитически поддержанного выбора. Архитектор в такой модели выступает в роли куратора, формулирующего цели, определяющего значимость критериев, интерпретирующего вычислительные результаты и осуществляющего окончательный синтез между числовыми показателями и качественными характеристиками архитектурного замысла. Следовательно, алгоритм становится не источником готовой формы, а инструментом расширения проектного мышления.

Потенциал сокращения трудоемкости климатического анализа на ранних этапах подтверждается и смежными исследованиями автоматизации BIM-ориентированных оценочных процедур. Так, в работе Дублевич и соавт., посвященной автоматизированной оценке дневного освещения в BIM-среде с использованием Dynamo, было показано

сокращение времени анализа на 40%, а в отдельных сценариях – до 80%. Хотя речь идет о частной задаче светового анализа, полученные результаты подтверждают общую тенденцию: перенос аналитических операций внутрь BIM-среды и их параметризация способны существенно ускорять принятие проектных решений [9].

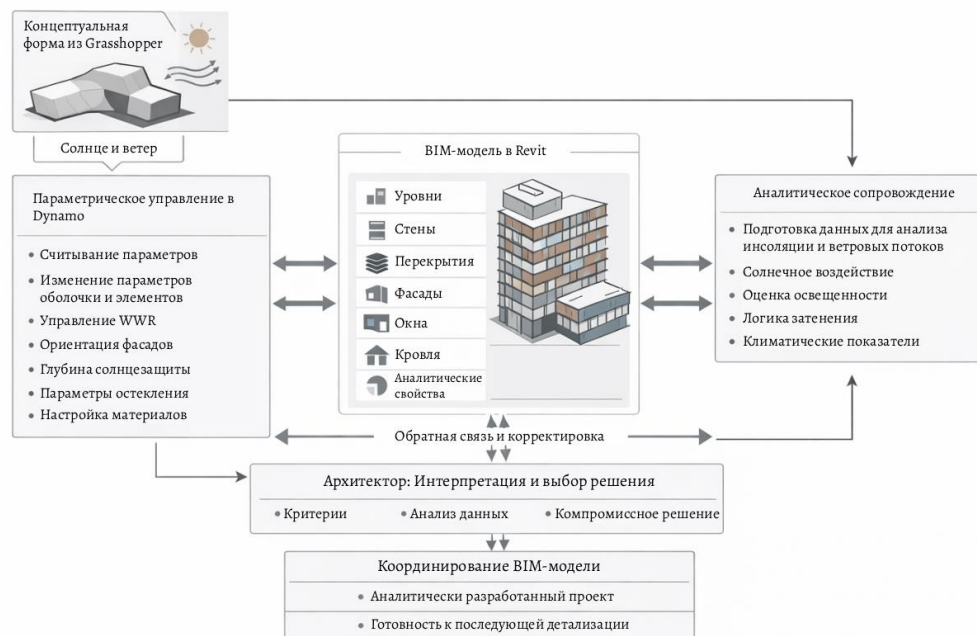


Рисунок 4. Схема параметрического управления и аналитического сопровождения BIM-модели в среде Dynamo.

Примечание: разработано авторами на основе [6, 7, 9].

Методологическая ценность алгоритмического подхода заключается не только в способности быстро генерировать и оценивать варианты, но и в выявлении взаимосвязей между параметрами проектного решения. Как показывают исследования в области BIM и планирование экспериментов, для проектировщика особенно значимы не отдельные численные значения, а понимание силы влияния факторов, их взаимодействий и устойчивых тенденций в пределах конкретной проектной задачи. В этом смысле алгоритмическое проектирование создает не только данные, но и знание о структуре проектной проблемы, тогда как интерпретация такого знания остается задачей архитектора-эксперта [15].

4. Интеграция алгоритмического проектирования с BIM-средой (на примере Dynamo)

На этапе перехода от концептуального формообразования к более детализированному проектированию ключевое значение приобретает интеграция алгоритмических методов с информационным моделированием зданий. В рамках предлагаемой методологии эта интеграция реализуется посредством использования среды Dynamo, обеспечивающей параметрическое управление геометрией, свойствами элементов и логикой обработки данных непосредственно внутри BIM-платформы.

В отличие от Grasshopper, ориентированного преимущественно на свободную генерацию и исследование геометрических систем, Dynamo функционирует в объектно-ориентированной структуре BIM, где архитектурные элементы представлены как семантически насыщенные объекты, обладающие набором параметров и связей. Это

позволяет осуществлять не только геометрическую, но и информационную оптимизацию проектных решений, включая работу с материалами, конструктивными характеристиками, показателями остекления и аналитическими сценариями.

Интеграция алгоритмического проектирования с BIM-средой включает несколько направлений: параметрическое управление элементами модели, согласование геометрии с результатами климатического анализа, подготовку данных для последующих специализированных расчетов, а также автоматизацию обработки и интерпретации проектной информации. В этом контексте Dynamo выступает как инструмент аналитической настройки и валидации проектных решений, обеспечивающий переход от абстрактной параметрической схемы к реалистичной информационной модели здания.

Таким образом, использование Dynamo в составе общей методологии формирует непрерывный цифровой контур проектирования, в котором данные, полученные на этапе концептуального анализа, не утрачиваются, а последовательно развиваются и уточняются. Это способствует повышению согласованности между ранними проектными решениями и их последующей реализацией, а также создает предпосылки для более эффективного междисциплинарного взаимодействия участников проектного процесса.

Существенным преимуществом такой логики является снижение зависимости от многоэтапной интероперабельности между различными программными средами. Как показывает практика BIM-ориентированного анализа, передача моделей во внешние расчетные программы нередко сопровождается потерей данных, ошибками преобразования и дополнительными временными затратами, вследствие чего аналитические процедуры откладываются на поздние стадии, когда проект уже менее податлив к изменениям. Использование встроенных средств визуального программирования, таких как Dynamo, позволяет удерживать анализ внутри BIM-среды и тем самым повышать непрерывность, оперативность и устойчивость проектного процесса [9].

Перспективным направлением дальнейшего развития предложенной методологии является ее сопряжение с системами BIM-IoT-ML, в которых цифровая модель здания перестает быть только проектным артефактом и начинает функционировать как динамическая среда для получения, обработки и интерпретации данных эксплуатации. Исследования последних лет показывают, что интеграция BIM и IoT позволяет организовать сбор и визуализацию данных о тепловом комфорте в реальном времени, включая построение тепловых карт и расчет PMV на основе актуальных измерений среды. Более того, в ряде работ делается шаг от нормативной модели комфорта к пользовательски ориентированной логике, где в расчет включаются не только стандартные показатели, но и реальные предпочтения пользователей здания, а алгоритмы машинного обучения используются для прогноза оптимальных условий. В таком развитии алгоритмическое проектирование получает выход за пределы стадии эскиза и начинает связывать замысел, модель и эксплуатационные данные в единую адаптивную систему принятия решений [8, 10, 16].

Заключение

В настоящем исследовании была предложена и теоретически обоснована методология применения алгоритмического проектирования для учета инсоляции и ветровых потоков на этапе эскизного архитектурного проектирования. Проведенный анализ показал, что включение алгоритмических инструментов в ранние стадии формообразования позволяет

рассматривать климатические параметры не как внешние ограничения, учитываемые постфактум, а как активные факторы, непосредственно влияющие на структуру проектного поиска и логику принятия пространственных решений. Тем самым эскизное проектирование приобретает более высокий уровень аналитической обоснованности и становится частью интегрированного процесса климатически ориентированного формообразования.

Теоретические результаты исследования позволяют сформулировать несколько ключевых выводов. Во-первых, Grasshopper и Dynamo следует рассматривать как взаимодополняющие, а не конкурирующие платформы, каждая из которых выполняет собственную функцию в едином цифровом контуре проектирования: Grasshopper обеспечивает гибкость параметрического моделирования, генерацию формы и проведение раннего климатического анализа, тогда как Dynamo выступает инструментом последующей параметрической настройки, координации и аналитического сопровождения решений в BIM-среде. Во-вторых, совмещение инсоляционного анализа, оценки ветровых потоков и многокритериальной оптимизации создает методологическую основу для перехода к климатически адаптивному эскизному проектированию, в котором выбор решения осуществляется не интуитивно, а в пространстве обоснованных альтернатив. В-третьих, алгоритмическая оптимизация не устраняет профессиональную роль архитектора, а, напротив, усиливает ее, поскольку окончательная интерпретация результатов, определение значимости критериев и синтез количественных и качественных характеристик остаются в сфере авторского проектного суждения.

Существенное значение имеет и то обстоятельство, что предложенная методология не претендует на замену детальных инженерных расчетов, выполняемых на последующих стадиях проектирования. Ее научная и практическая ценность заключается прежде всего в том, что она позволяет структурировать ранний этап проектной работы, расширить пространство поиска архитектурных решений и повысить качество предварительного выбора в условиях высокой неопределенности. В этом смысле алгоритмическое проектирование выступает не только как цифровой инструмент генерации вариантов, но и как методологический механизм согласования климатических, энергетических, функциональных и архитектурно-композиционных требований в рамках единой проектной логики.

Таким образом, предложенная в статье концептуальная модель может рассматриваться как теоретическая база для дальнейшего развития вычислительно поддерживаемого и климатически ориентированного архитектурного проектирования. Перспективы дальнейших исследований связаны с апробацией данной методологии на конкретных архитектурных кейсах, уточнением критериев многокритериальной оценки в зависимости от климатического контекста и типа объекта, а также с дальнейшей разработкой способов интеграции аналитических сценариев в непрерывный цифровой контур проектирования. В более широком смысле результаты исследования подтверждают, что алгоритмическое проектирование создает предпосылки для перехода от интуитивного эскизирования к аналитически поддержанному проектному мышлению, в котором архитектурная форма понимается как результат осмысленного выбора в системе взаимосвязанных параметров, ограничений и целей.

Благодарность, конфликт интересов

Исследование выполнено при поддержке Казахского национального исследовательского технического университета им. К.И. Сатпаева. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов

Шегенова М.: разработка теоретической модели оптимизации, концептуализация, сбор и анализ литературы, проведение сравнительного анализа платформ, написание основного текста.

Мауленова Г.: руководство исследованием, методологический контроль, критический пересмотр и редактирование текста, утверждение финальной версии.

Султанова А.: визуализация концепций, дополнение разделов.

Список литературы

1. BIM-driven energy simulation and optimization for net-zero tall buildings: sustainable construction management / Sajjad M., Hu A., Alshehri A. M., Waqar A., Khan A. M., Bageis A. S., Elaraki Y. G., Shohan A. A. A., Benjeddou O. // *Frontiers in Built Environment*. 2024. Vol. 10. Art. 1296817. DOI: 10.3389/fbuil.2024.1296817.
2. Azhar S. Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry // *Leadership and Management in Engineering*. 2011. Vol. 11, no. 3. P. 241–252. DOI: 10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127.
3. Pereira F. O. R., Silva C. A. N., Turkienikz B. A methodology for Sunlight Urban Planning: a computer-based solar and Sky Vault obstruction analysis // *Solar Energy*. 2001. Vol. 70, no. 3. P. 217–226. DOI: 10.1016/S0038-092X(00)00094-3.
4. Multi-zone indoor CFD under limited information: an approach coupling solar analysis and BIM for improved accuracy / Kwok H. H. L., Cheng J. C. P., Li A. T. Y., Tong J. C. K., Lau A. K. H. // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 244. Art. 118912. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118912.
5. An approach to using life cycle assessment generative algorithm in buildings: optimisation of BIM models during the early design phase / Gómez de Cózar J. C., García-Martínez A., Morillo Merino B., Campón Tovar J. A., Rey-Álvarez B. // *Journal of Cleaner Production*. 2025. Vol. 530. Art. 146847. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.146847.
6. Amoruso F. M., Dietrich U., Schuetze T. Integrated BIM-parametric workflow-based analysis of daylight improvement for sustainable renovation of an exemplary apartment in Seoul, Korea // *Sustainability (Switzerland)*. 2019. Vol. 11. Art. 2699. DOI: 10.3390/su11092699.
7. Khan H. Microclimatic architectural design by interfacing grasshoppers and Dynamo with Rhino and Revit // *Measurement: Sensors*. 2024. Vol. 33. Art. 101143. DOI: 10.1016/j.measen.2024.101143.
8. Automatic Indoor Thermal Comfort Monitoring Based on BIM and IoT Technology / Liang W., Qiang G., Fan L., Zhang H., Ye Z., Tang S. // *Buildings*. 2024. Vol. 14, no. 11. Art. 3361. DOI: 10.3390/buildings14113361.
9. BIM to BREEAM: a workflow for automated daylighting assessment of existing buildings / Dubljević S., Tepavčević B., Stefanović A., Anđelković A. S. // *Energy and Buildings*. 2024. Vol. 312. Art. 114208. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114208.
10. Kanna K., AIT Lachguer K., Yaagoubi R. MyComfort: An integration of BIM-IoT-machine learning for optimizing indoor thermal comfort based on user experience // *Energy and*

- Buildings. 2022. Vol. 277. Art. 112547. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112547.
11. Alothaimeen I., Arditi D., Türkakın O. H. Multi-objective optimization for LEED-new construction using BIM and genetic algorithms // Automation in Construction. 2023. Vol. 149. Art. 104807. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.104807.
 12. Islam Md. S., Kabir Md. M., Kabir N. Artificial Neural Networks based Prediction of Insolation on Horizontal Surfaces for Bangladesh // Procedia Technology. 2013. Vol. 10. P. 482–491. DOI: 10.1016/j.protcy.2013.12.386.
 13. Implementation of BIM Energy Analysis and Monte Carlo Simulation for Estimating Building Energy Performance Based on Regression Approach: A Case Study / Tahmasebinia F., Jiang R., Sepasgozar S., Wei J., Ding Y., Ma H. // Buildings. 2022. Vol. 12, no. 4. Art. 449. DOI: 10.3390/buildings12040449.
 14. Pathirana S., Rodrigo A., Halwatura R. Effect of building shape, orientation, window to wall ratios and zones on energy efficiency and thermal comfort of naturally ventilated houses in tropical climate // International Journal of Energy and Environmental Engineering. 2019. Vol. 10. P. 107–120. DOI: 10.1007/s40095-018-0295-3.
 15. Schlueter A., Geyer P. Linking BIM and Design of Experiments to balance architectural and technical design factors for energy performance // Automation in Construction. 2018. Vol. 86. P. 33–43. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.10.021.
 16. Internet of Things (IoT) for Integrating Environmental and Localization Data in Building Information Modeling (BIM) / Teizer J., Wolf M., Golovina O., Perschewski M., Propach M., Neges M., König M. // Proceedings of the 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2017). Taipei, Taiwan, 2017. P. 603–609. DOI: 10.22260/ISARC2017/0084.

M. Shegenova^{*1}, G. Maulenova¹, A. Sultanova²

¹*Satbayev University, Almaty, Kazakhstan*

³*RUDN University, Moscow, Russia*

Algorithmic design as a methodological framework for optimizing insolation and wind flows at the stage of conceptual architectural form generation

Abstract. Contemporary architectural practice faces the need to account for climatic factors already at the early stages of design, when the key parameters of the future object's spatial, functional, and environmental performance are established. The subject of this study is the methodological potential of algorithmic design as a tool for transforming conceptual design into an analytically grounded process. The aim of the article is to systematize and theoretically substantiate the methodology for applying the Grasshopper and Dynamo software environments to account for insolation and wind flows at the conceptual design stage. The study is theoretical and methodological in nature and is based on a comparative analysis of instrumental platforms, a synthesis of approaches to climate modeling, and an examination of the principles of multi-criteria optimization in architecture. As a result, a conceptual model of iterative integrated design is proposed, in which the analysis of insolation and aeration is considered an active form-generating factor, while design decisions are made within a space of trade-offs between climatic, energy-related, functional, and architectural-aesthetic criteria. It is substantiated that algorithmic design

can be regarded as a methodological foundation for the transition to “computational sketching”, which ensures a higher level of coherence between design decisions and the requirements of sustainable and climate-adaptive design.

Keywords: algorithmic design, computational design, insolation, wind flows, optimization, sketch design, Dynamo, Grasshopper, BIM.

References

1. BIM-driven energy simulation and optimization for net-zero tall buildings: sustainable construction management / Sajjad M., Hu A., Alshehri A. M., Waqar A., Khan A. M., Bageis A. S., Elaraki Y. G., Shohan A. A. A., Benjeddou O. // *Frontiers in Built Environment*. 2024. Vol. 10. Art. 1296817. DOI: 10.3389/fbuil.2024.1296817.
2. Azhar S. Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry // *Leadership and Management in Engineering*. 2011. Vol. 11, no. 3. P. 241–252. DOI: 10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127.
3. Pereira F. O. R., Silva C. A. N., Turkienikz B. A methodology for Sunlight Urban Planning: a computer-based solar and Sky Vault obstruction analysis // *Solar Energy*. 2001. Vol. 70, no. 3. P. 217–226. DOI: 10.1016/S0038-092X(00)00094-3.
4. Multi-zone indoor CFD under limited information: an approach coupling solar analysis and BIM for improved accuracy / Kwok H. H. L., Cheng J. C. P., Li A. T. Y., Tong J. C. K., Lau A. K. H. // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 244. Art. 118912. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118912.
5. An approach to using life cycle assessment generative algorithm in buildings: optimisation of BIM models during the early design phase / Gómez de Cózar J. C., García-Martínez A., Morillo Merino B., Campón Tovar J. A., Rey-Álvarez B. // *Journal of Cleaner Production*. 2025. Vol. 530. Art. 146847. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.146847.
6. Amoruso F. M., Dietrich U., Schuetze T. Integrated BIM-parametric workflow-based analysis of daylight improvement for sustainable renovation of an exemplary apartment in Seoul, Korea // *Sustainability (Switzerland)*. 2019. Vol. 11. Art. 2699. DOI: 10.3390/su11092699.
7. Khan H. Microclimatic architectural design by interfacing grasshoppers and Dynamo with Rhino and Revit // *Measurement: Sensors*. 2024. Vol. 33. Art. 101143. DOI: 10.1016/j.measen.2024.101143.
8. Automatic Indoor Thermal Comfort Monitoring Based on BIM and IoT Technology / Liang W., Qiang G., Fan L., Zhang H., Ye Z., Tang S. // *Buildings*. 2024. Vol. 14, no. 11. Art. 3361. DOI: 10.3390/buildings14113361.
9. BIM to BREEAM: a workflow for automated daylighting assessment of existing buildings / Dubljević S., Tepavčević B., Stefanović A., Anđelković A. S. // *Energy and Buildings*. 2024. Vol. 312. Art. 114208. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114208.
10. Kanna K., AIT Lachguer K., Yaagoubi R. MyComfort: An integration of BIM-IoT-machine learning for optimizing indoor thermal comfort based on user experience // *Energy and Buildings*. 2022. Vol. 277. Art. 112547. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112547.
11. Alothaimeen I., Arditi D., Türkakın O. H. Multi-objective optimization for LEED-new construction using BIM and genetic algorithms // *Automation in Construction*. 2023. Vol. 149. Art. 104807. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.104807.
12. Islam Md. S., Kabir Md. M., Kabir N. Artificial Neural Networks based Prediction of Insolation on Horizontal Surfaces for Bangladesh // *Procedia Technology*. 2013. Vol. 10. P. 482–491. DOI: 10.1016/j.protcy.2013.12.386.

13. Implementation of BIM Energy Analysis and Monte Carlo Simulation for Estimating Building Energy Performance Based on Regression Approach: A Case Study / Tahmasebinia F., Jiang R., Sepasgozar S., Wei J., Ding Y., Ma H. // Buildings. 2022. Vol. 12, no. 4. Art. 449. DOI: 10.3390/buildings12040449.
14. Pathirana S., Rodrigo A., Halwatura R. Effect of building shape, orientation, window to wall ratios and zones on energy efficiency and thermal comfort of naturally ventilated houses in tropical climate // International Journal of Energy and Environmental Engineering. 2019. Vol. 10. P. 107–120. DOI: 10.1007/s40095-018-0295-3.
15. Schlueter A., Geyer P. Linking BIM and Design of Experiments to balance architectural and technical design factors for energy performance // Automation in Construction. 2018. Vol. 86. P. 33–43. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.10.021.
16. Internet of Things (IoT) for Integrating Environmental and Localization Data in Building
17. Information Modeling (BIM) / Teizer J., Wolf M., Golovina O., Perschewski M., Propach M., Neges M., König M. // Proceedings of the 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2017). Taipei, Taiwan, 2017. P. 603–609. DOI: 10.22260/ISARC2017/0084.

Сведения об авторах:

Шегенова М. – автор для корреспонденции, магистрант кафедры «Архитектура» Казахского национального исследовательского технического университета им. К.И.Сатпаева, ул. Сатпаева, 22, 050013, Алматы, Казахстан.

Мауленова Г. – кандидат архитектуры, ассоциированный профессор кафедры «Архитектура» Казахского национального исследовательского технического университета им. К.И.Сатпаева, ул. Сатпаева, 22, 050013, Алматы, Казахстан.

Султанова А. – старший преподаватель кафедры «Архитектура и реставрация» Инженерной академии Российского университета дружбы народов, ул. Миклухо-Маклая, 6, 117198, Москва, Россия.

Shegenova M. – corresponding author, master's student, Department of Architecture, Satbayev University, 22 Satbayev St., 050013, Almaty, Kazakhstan

Maulenova G. – Candidate of Architecture, Associate Professor, Department of Architecture, Satbayev University, 22 Satbayev St., 050013, Almaty, Kazakhstan.

Sultanova A. – Senior Lecturer, Department of Architecture and Restoration, Engineering Academy, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St., 117198, Moscow, Russia.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).