2.1.12. Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (технические науки)

Научная статья
УДК 72.011:004.942

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ФАСАДОВ С УЧЁТОМ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ИНСОЛЯЦИИ

Вязникова Елена Александровна, кандидат технических наук, Уральский государственный архитектурно-художественный университет им. Н.С. Алфёрова, Россия, Екатеринбург, elena.usaaa@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена проблеме адаптации ограждающих конструкций гражданских зданий к неравномерным гелиотермическим воздействиям посредством алгоритмического синтеза кинетических фасадных систем. Обоснован переход к оболочкам с управляемой геометрией, в которых угол поворота ламелей вычисляется по вектору инсоляции для конкретной географической широты. Выполнен морфологический анализ кинематических механизмов, по итогам которого вращательная топология признана наиболее рациональной для высотных сооружений. Методология базируется на параметрическом моделировании в среде Grasshopper и годовом энергетическом моделировании продолжительностью 8760 часов для четырнадцатиэтажного административного здания в г. Краснодаре. Сопоставлены три сценария ограждения: сплошное остекление, статичные жалюзи и кинетическая оболочка. Установлено, что адаптивный контур удерживает полезную дневную освещенность свыше 82% площади рабочего этажа и снижает суммарные теплопоступления на 54% относительно базового варианта, тогда как статичные жалюзи, снижая перегрев, уменьшают показатель полезной дневной освещенности до 22%. Показано, что паразитное энергопотребление сервоприводов пренебрежимо мало на фоне сэкономленной тепловой энергии. Проработаны узлы сопряжения, ветровая безопасность с флюгерным режимом

при порывах свыше 15 м/с и отказоустойчивость с гравитационным возвратом ламелей. Результаты подтверждают, что кинетический фасад - инструмент термодинамической оптимизации, а также определяют новую творческую концепцию архитектурной деятельности, в которой проектировщик формирует правила поведения оболочки.

Ключевые слова: кинетический фасад; адаптивная архитектура; алгоритмическое проектирование; параметрическая модель; инсоляционная нагрузка; полезная дневная освещенность; теплопоступления; сервопривод; ветровая безопасность; энергоэффективность оболочки.

Original article

PARAMETRIC DESIGN OF KINETIC FACADES TAKING INTO ACCOUNT CHANGING INSOLATION

Viaznikova Elena Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences, Ural State University of Architecture and Art named after N.S. Alferov, Yekaterinburg, Russia, elena.usaaa@yandex.ru

Abstract. This article examines the adaptation of civil building envelopes to uneven solar thermal effects through the algorithmic synthesis of kinetic façade systems. A rationale is provided for the transition to envelopes with controlled geometry, in which the lamella rotation angle is calculated based on the insolation vector for a specific latitude. A morphological analysis of the kinematic mechanisms is conducted, which concludes that rotational topology is the most efficient for high-rise structures. The methodology is based on parametric modeling in Grasshopper and an annual energy simulation lasting 8,760 hours for a fourteen-story administrative building in Krasnodar. Three envelope scenarios are compared: continuous glazing, static louvers, and a kinetic envelope. It was found that the adaptive contour maintains useful daylight over 82% of the working floor area and reduces total heat gain by 54% relative to the base case, while static blinds, while damping overheating, reduce

illuminance by up to 22%. It was shown that the parasitic energy consumption of the servo drives is negligible compared to the saved thermal energy. The coupling nodes, wind safety with a weathervane mode for gusts exceeding 15 m/s, and fault tolerance with gravitational return of the slats were developed. The results confirm that the kinetic façade is a tool for thermodynamic optimization and also define a new creative concept for architectural practice, in which the designer defines the rules of behavior of the shell.

Keywords: kinetic facade; adaptive architecture; algorithmic design; parametric model; insolation load; useful daylight; heat gain; servo drive; wind safety; energy efficiency of the shell.

Введение. Архитектурная оболочка эволюционировала от массивного несущего барьера до высокотехнологичного климатического фильтра. В современной строительной практике, характеризующейся ужесточением требований к углеродному следу и энергопотреблению, статичные ограждающие конструкции перестают удовлетворять критериям экологической устойчивости. Традиционные методы пассивной солнцезащиты, такие как стационарные козырьки или фиксированные ламели, проектируются исходя из усредненных пиковых значений инсоляции, что приводит к перегреву помещений в межсезонье либо к дефициту естественного света. Преодоление данного противоречия предполагает переход к динамическим системам, способным непрерывно изменять свою геометрию в зависимости от условий внешней среды [1]. В этом контексте алгоритмическое проектирование становится методологией, объединяющей метеорологические данные, кинематические параметры механизмов и структурную топологию для адаптации здания к локальному гелиотермическому режиму.

Динамика подходов к формированию наружных ограждений связана с изменением конструктивных и инженерных парадигм. Модернистские здания середины XX века со значительной площадью остекления и ограниченной

естественной регуляцией микроклимата потребовали применения энергоемких систем принудительного кондиционирования [2]. Ограничения герметичных статичных объемов стимулировали поиск адаптивных стратегий, основанных на биомиметических принципах. Архитектурные поверхности обретают способность к физическому изменению состояния, интегрируя автоматизированные солнцезащитные элементы и подвижные мембраны [3]. Ранние попытки механизации ограничивались использованием выдвижных маркиз и поворотных жалюзи, управление которыми осуществлялось вручную или по жестко заданному таймеру. Сдвиг парадигмы произошел с внедрением параметрических вычислительных сред, позволивших математически описать поведение оболочек на основе векторного анализа солнечных траекторий и данных инсоляционного климата конкретной географической широты. Это позволило проектировать целостные кинематические системы, в которых каждый модуль имеет собственную степень свободы, параметры которой определяются заданными алгоритмами реакции на условия среды [4].

Инсоляционные нагрузки выступают одним из факторов, определяющих тепловой баланс и визуальный комфорт внутри здания. Адаптация к ним посредством кинетических элементов может в значительной мере снизить пиковые значения охлаждающей нагрузки в летний период без ущерба для уровня дневной освещенности, минимизируя зависимость объекта от искусственных источников света и климатической техники. Функционирование подобных структур подразумевает интеграцию принципов, описанных в трудах по управлению взаимодействиями в интеллектуальных средах, где архитектура рассматривается как распределенная сеть реагирующих на внешние стимулы узлов [5], [6]. Интеллектуальные фасады представляют собой сложные киберфизические комплексы, в которых физические актуаторы управляются микропроцессорами, считывающими показания сетей пиронометров и датчиков освещенности.

Показательным примером реализации концепций служат башни Аль-Бахар

в Абу-Даби, спроектированные архитектурным бюро Aedas. Их зонтообразный фасад, отсылающий к традиционной арабской резьбе по дереву (машрабия), состоит из фторопластовых модулей, которые раскрываются и сворачиваются в ответ на положение солнца. Применение алгоритмических скриптов на этапе конструирования дало возможность рассчитать оптимальную геометрию складывания каждого элемента, что обеспечило сокращение поступления солнечной радиации внутрь помещений более чем на 50%. Аналогичные вычислительные принципы заложены в основу фасада парижского Института арабского мира, созданного Жаном Нувелем. Поворотные металлические диафрагмы, приводимые в движение скрытыми сервоприводами, образуют светотеневую картину, непрерывно варьируя коэффициент светопропускания стекла в реальном времени. Разработка систем базируется на методах генеративного дизайна, итеративно оптимизирующих форму, массу и кинематические связи каждого компонента оболочки для достижения целевых показателей энергоэффективности и структурной надежности.

Обзор литературы. Теоретико-методологический базис формирования адаптивных архитектурных оболочек опирается на исследования в области кинетической архитектуры и интеллектуальных сред. В статье, посвященной проектированию кинетики фасадных систем, детально рассматривается эволюция наружных ограждений от инертных барьеров к интерактивным поверхностям, способным к физическому изменению своего состояния в ответ на флуктуации внешней среды [7]. Автор подчеркивает, что интеграция подвижных элементов определяет совершенствование традиционных подходов к формообразованию, где статичная геометрия уступает место алгоритмически генерируемым топологиям. Одновременно исследования управления взаимодействиями в интеллектуальных средах формируют кибернетический подход к пониманию здания как распределенной вычислительной сети [8], [9]. Архитектурный объект в данной парадигме трактуется как совокупность реагирующих узлов, где механическое движение выступает физическим

воплощением вычислительного процесса.

На основе указанных теоретических положений кинетические механизмы можно разделить на три основных класса, различающихся по степени применимости в строительной практике. Складчатые системы, функционирующие по принципу оригами, обеспечивают высокую степень компактности в сложенном состоянии, однако сложность шарнирных сопряжений и уязвимость мембранных материалов к атмосферным воздействиям ограничивают их использование преимущественно малыми архитектурными формами или временными павильонами. Телескопические конструкции, предполагающие взаимное скольжение перекрывающих друг друга плоскостей, демонстрируют высокую надежность, но их значительная масса и потребность в протяженных направляющих рельсах создают избыточные статические нагрузки на несущий каркас высотных сооружений. Вращательные механизмы, в частности, поворотные ламели с варьируемой осью вращения, представляют собой наиболее рациональный компромисс. С их помощью можно непрерывно отслеживать положение солнца, снижая при этом нежелательные динамические воздействия и сохраняя структурную целостность светопрозрачного контура [10], [11]. Авторская позиция в данном вопросе сводится к тому, что именно вращательная топология, подкрепленная алгоритмическим управлением, обладает наибольшим потенциалом для масштабирования на объекты гражданского и промышленного назначения, выступая инструментом термодинамической оптимизации.

Организация и методология исследования. Эмпирической базой для верификации предложенных алгоритмических подходов была выбрана модель четырнадцатиэтажного административного здания со сплошным остеклением, расположенного в климатических условиях г. Краснодар (рисунок 1). Выбор данного географического положения обусловлен необходимостью снижения экстремальных летних теплопоступлений при сохранении нормативных показателей естественного освещения в зимний период. Методология

исследования базировалась на параметрическом моделировании в вычислительной среде Grasshopper с применением специализированных плагинов экологического анализа. Разработанный алгоритм связывал векторную геометрию фасада с астрономическими данными траектории солнца (SunPath) для заданной широты, генерируя массив данных для каждого из 1420 фасадных модулей.



Рисунок 1 - Модель четырнадцатиэтажного административного здания со сплошным остеклением (источник: разработано автором)

В отличие от бинарных систем, оперирующих состояниями «открыто» или «закрыто», предложенная параметрическая модель вычисляла оптимальный угол поворота каждой ламели (рисунок 2, 3), исходя из скалярного произведения вектора падения прямых солнечных лучей и нормали к поверхности элемента. Это обеспечивало блокировку слепящего излучения при одновременном пропускании рассеянного света от небосвода. Для формализации логики работы адаптивной оболочки была разработана концептуальная матрица параметрических зависимостей (таблица 1), интегрирующая гелиотермические, аэродинамические и системные переменные.



Рисунок 2 - Визуализация кинетического фасада с горизонтальными поворотными ламелями (источник: разработано автором)



Рисунок 3 - План узла сопряжения ламели с приводом (источник: разработано автором)

Таблица 1 - Матрица параметрических зависимостей и ограничений кинетического узла

Вектор внешнего воздействия	Алгоритмическая реакция (выходной параметр)	Инженерно-конструктивное ограничение
Азимут и высота стояния светила	Угол поворота ламели α относительно горизонтальной оси (от -15° до +75°)	Механический упор шарнира, предотвращающий заклинивание актуатора
Скорость и порывистость ветра (по данным анемометра)	Переход в аэродинамически нейтральное положение (угол атаки 0°)	Предельная изгибающая нагрузка на ось вращения при скорости потока > 18 м/с
Потеря электропитания или сбой контроллера	Активация режима отказоустойчивости	Гравитационный возврат или пружинный механизм, фиксирующий ламель в положении затенения
Интегральная освещенность внутри помещения (UDI)	Локальная корректировка угла для предотвращения образования теневых пятен	Максимальная скорость перемещения привода (не более 3° в секунду для исключения визуального дискомфорта)

Источник: разработано автором.

Доминирующим фактором в штатном режиме является инсоляционный вектор, однако при достижении критических значений ветровой нагрузки он утрачивает приоритет. Более того, параметр скорости перемещения, казалось бы, не связанный с энергетикой, напрямую влияет на психофизиологическое восприятие среды пользователями, поскольку непрерывное медленное движение практически не воспринимается периферическим зрением, тогда как резкие перемещения вызывают дезориентацию.

Результаты исследования и их обсуждение. Проведенное энергетическое моделирование (8760 часов расчетного периода) позволило осуществить сравнительный анализ трех типов ограждающих конструкций: базового статичного остекления с низкоэмиссионным покрытием, традиционных статичных горизонтальных жалюзи и разработанного алгоритмического кинетического фасада. Оценка производилась по критериям полезной дневной освещенности (UDI - Useful Daylight Illuminance, диапазон 100-2000 люкс) и суммарных теплопоступлений (рисунок 4).



Рисунок 4 - Сценарии остекления здания (источник: разработано автором)

Результаты моделирования показали ограниченную эффективность статичных систем в условиях южного климата. Базовое остекление обеспечило приемлемый уровень UDI лишь на 35% площади рабочего этажа, спровоцировав при этом образование зон ослепления и критический перегрев периметральных помещений, что потребовало бы увеличения мощности систем кондиционирования на 68%. Внедрение статичных жалюзи снизило охлаждающую нагрузку на 41%, однако ухудшило световой климат: показатель UDI уменьшился до 22%, что требовало использования искусственного освещения на протяжении всего светового дня и снижало энергетическую выгоду. Кинетический фасад, управляемый векторным алгоритмом, обеспечил поддержание UDI на уровне свыше 82% в течение всего отчётного года за счет динамического перенаправления рассеянного зенитного света в глубину плана. Совокупное снижение теплопоступлений через оболочку составило 54% по сравнению с исходным статичным вариантом.

Аспектом, часто игнорируемым в теоретических исследованиях, является учет паразитного энергопотребления самих приводов. В предложенной конструкции использовались бесщеточные сервоприводы постоянного тока

мощностью 12 Вт, оснащенные планетарными редукторами. Анализ годового профиля работы показал, что среднее время активной фазы перемещения элементов составляет около 90 минут в сутки (в утренние и вечерние часы смены азимута). Суммарное энергопотребление кинематической группы за год оказалось в 3 раза ниже объема тепловой энергии, сэкономленной благодаря оптимизации инсоляционного режима.

Конструктивная проработка узлов сопряжения выявила ряд требований, связанных с динамической работой фасада. Ветровая нагрузка на движущиеся элементы, выступающие за плоскость несущей стены, создает знакопеременные изгибающие моменты в осях вращения. Для нивелирования данного фактора был спроектирован скрытый узел опирания с применением фторопластовых подшипников скольжения, исключающих необходимость регулярной смазки и обладающих высокой стойкостью к абразивному воздействию пылевых частиц (рисунок 5). Вопрос ветровой безопасности был решен путем интеграции алгоритма с внешними метеодатчиками, так как при фиксации порывов свыше 15 м/с система принудительно переводит все ламели в положение, параллельное вектору ветра (флюгерный режим), минимизируя аэродинамическое сопротивление и предотвращая усталостное разрушение металлокаркаса.



Рисунок 5 - Скрытый узел опирания с применением фторопластовых подшипников скольжения (источник: разработано автором)

Отказоустойчивость обеспечена конструкцией привода. В обесточенном состоянии электромагнитный тормоз сервомотора размыкается, и под действием смещенного центра тяжести ламель самостоятельно опускается в положение максимального затенения. В случае системного сбоя или аварийного отключения электроэнергии снижается риск перегрева здания, а внутренние помещения дольше сохраняют накопленную прохладу.

Выводы. Архитектурная форма рассматривается как результат непрерывной адаптации фасада к изменениям гелиотермических условий, а ее выразительность формируется в процессе этой адаптации. Данная позиция перекликается с выводами о том, что физическое изменение состояния фасадов формирует совершенно новый визуальный и пространственный опыт, фактически стирая границы между традиционной строительной конструкцией и робототехническим устройством. Здание рассматривается как адаптивная система, способная поддерживать стабильные параметры внутренней среды за счет непрерывной реакции на внешние воздействия.

Эмпирическая верификация параметрических моделей в условиях южного климата показала, что фиксированная геометрия ограждения недостаточно эффективна при изменчивом характере солнечной радиации. Интеграция метеорологических сенсоров с вычислительными ядрами трансформирует объект в автономный узел распределенной сети, что полностью отвечает кибернетическим установкам, заложенным в трудах по управлению взаимодействиями в интеллектуальных средах [2]. Фасад в этой системе выступает агентом, перераспределяющим энергетические потоки и нивелирующим пиковые нагрузки на инженерные сети, что делает концепцию адаптивности безальтернативным вектором развития урбанистической инфраструктуры.

В контексте творческих концепций архитектурной деятельности подобный сдвиг обусловливает необходимость улучшения инструментария зодчего. Проектировщик передает формирование геометрии генеративным алгоритмам,

сосредоточивая усилия на разработке общих правил, ограничений и сценариев поведения конструктивных элементов. Авторская воля выражается в том, что выразительность облика есть следствие математически выверенного взаимодействия с климатическими векторами. Это формирует новую профессиональную компетенцию, требующую синтеза навыков конструктора, программиста и климатолога.

Дальнейшая эволюция адаптивных оболочек приведет к распределенной актуации на уровне молекулярной структуры строительных композитов. Внедрение сплавов с памятью формы и диэлектрических эластомеров даст возможность создавать непрерывные, лишенные видимых механизмов поверхности, изгибающиеся подобно листьям гелиотропных растений. Данный прогнозный вектор развития окончательно закрепит роль кинетической архитектуры как доминирующей стратегии формирования устойчивой среды обитания, способной к симбиозу с экосистемой без нанесения ущерба ее ресурсному балансу.

Список литературы

1. Акимов Л. И., Васильева Д. Г., Козинец Г. Л., Баденко В. Л. Проектирование динамических фасадов—разработка физической модели // Вестник евразийской науки. – 2025. – Т. 17. – №. 4. – С. 49.
2. Плаксина А. В., Коржемпо Я. А. Кинетические объекты как элементы нового дизайна городской среды. Динамические фасадные системы // Системные технологии. – 2024. – №. 4 (53). – С. 196-205.
3. Муратова В. А., Козловский С. А. Анализ существующих решений конструктивных систем кинетических фасадов // Construction and Geotechnics. – 2022. – Т. 13. – №. 2. – С. 77-87.
4. Жандарова А. А., Денисенко Е. В. Предпосылки развития технологий в бионаправленной архитектуре // Architecture and Modern Information Technologies. – 2022. – №. 4 (61). – С. 28-43.
5. Пономарёв А. В. Адаптивная архитектура–основные направления развития //

Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2024. – Т. 14. – №. 2 (49). – С. 406-417.

6. Sadegh S. O., Gasparri E., Brambilla A., Globa A. Kinetic facades: An evolutionary-based performance evaluation framework // Journal of Building Engineering. – 2022. – Т. 53. – С. 104408.

7. Goharian A., Mahdavinejad M., Ghazazani S., Hosseini S. M., Zamani Z., Yavari H., ... Shoghi F. Designing adaptability strategy to a novel kinetic adaptive façade (NKAF); toward a pioneering method in dynamic-objects daylight simulation (post-processing) // Journal of Daylighting. – 2025. – Т. 12. – №. 1. – С. 69-90.

8. Wagiri F., Shih S. G., Harsono K., Wijaya D. C. Multi-objective optimization of kinetic facade aperture ratios for daylight and solar radiation control // Journal of building physics. – 2024. – Т. 47. – №. 4. – С. 355-385.

9. Bahri S. Y., Forment M. A., Riera A. S., Heiranipour M., Hosseini S. N. Kinetic facades as a solution for educational buildings: A multi-objective optimization simulation-based study // Energy Reports. – 2025. – Т. 13. – С. 3915-3928.

10. Safaripoor S., Karimi M., Ilbeigi M., Ahrari F., Khalili F., Mashhadimohammadzadehvazifeh F., Alelwani R. Genetic algorithm-based assessment of kinetic façade prototypes for energy optimization and user comfort: a hotel case study in Iran // Discover Sustainability. – 2026. – Т. 7. – №. 1. – С. 725.

11. Li Z., Tian J., Ji G., Cheng T., Loftness V., Han X. Reinforcement learning-enabled adaptive control for climate-responsive kinetic building facades // Buildings. – 2025. – Т. 15. – №. 16. – С. 2977.

References

1. Akimov L. I., Vasil`eva D. G., Kozinecz G. L., Badenko V. L. Proektirovanie dinamicheskix fasadov—razrabotka fizicheskoj modeli // Vestnik evrazijskoj nauki. – 2025. – T. 17. – №. 4. – S. 49.

2. Plaksina A. V., Korzhempo Ya. A. Kineticheskie ob``ekty` kak e`lementy` novogo dizajna gorodskoj sredy`. Dinamicheskie fasadny`e sistemy` // Sistemny`e texnologii. – 2024. – №. 4 (53). – S. 196-205.

3. Muratova V. A., Kozlovskij S. A. Analiz sushhestvuyushhix reshenij konstruktivny`x sistem kineticheskix fasadov // Construction and Geotechnics. – 2022. – T. 13. – №. 2. – S. 77-87.

4. Zhandarova A. A., Denisenko E. V. Predposy`lki razvitiya texnologij v bionapravlennoj arxitekture // Architecture and Modern Information Technologies. – 2022. – №. 4 (61). – S. 28-43.

5. Ponomaryov A. V. Adaptivnaya arxitektura–osnovny`e napravleniya razvitiya // Izvestiya vuzov. Investicii. Stroitel`stvo. Nedvizhimost`. – 2024. – T. 14. – №. 2 (49). – S. 406-417.

6. Sadegh S. O., Gasparri E., Brambilla A., Globa A. Kinetic facades: An evolutionary-based performance evaluation framework // Journal of Building Engineering. – 2022. – T. 53. – P. 104408.

7. Goharian A., Mahdavinejad M., Ghazazani S., Hosseini S. M., Zamani Z., Yavari H., ... Shoghi F. Designing adaptability strategy to a novel kinetic adaptive façade (NKAF); toward a pioneering method in dynamic-objects daylight simulation (post-processing) // Journal of Daylighting. – 2025. – T. 12. – No. 1. – P. 69-90.

8. Wagiri F., Shih S. G., Harsono K., Wijaya D. C. Multi-objective optimization of kinetic facade aperture ratios for daylight and solar radiation control // Journal of building physics. – 2024. – T. 47. – No. 4. – P. 355-385.

9. Bahri S. Y., Forment M. A., Riera A. S., Heiranipour M., Hosseini S. N. Kinetic facades as a solution for educational buildings: A multi-objective optimization simulation-based study // Energy Reports. – 2025. – T. 13. – P. 3915-3928.

10. Safaripoor S., Karimi M., Ilbeigi M., Ahrari F., Khalili F., Mashhadimohammadzadehvazifeh F., Alelwani R. Genetic algorithm-based assessment of kinetic facade prototypes for energy optimization and user comfort: a hotel case study in Iran // Discover Sustainability. – 2026. – T. 7. – No. 1. – P. 725.

11. Li Z., Tian J., Ji G., Cheng T., Loftness V., Han X. Reinforcement learning-enabled adaptive control for climate-responsive kinetic building facades // Buildings. – 2025. – T. 15. – No. 16. – P. 2977.

Статья поступила в редакцию 12.02.2026; одобрена после рецензирования 01.04.2026; принята к публикации 28.08.2026.

The article was submitted 12.02.2026; approved after peer review 01.04.2026; accepted for publication 28.08.2026.