Научная статья
УДК 72.03:004.94

АНАЛИЗ ИНСОЛЯЦИИ И ЕСТЕСТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ МНОГОСВЕТНЫХ АТРИУМОВ

Вишневская Юлия Александровна, кандидат технических наук,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Россия, Москва, iuliia.bmstu@inbox.ru

Аннотация. В статье рассматривается проблема оптимизации инсоляционного режима и естественного освещения многосветных атриумов общественных зданий посредством алгоритмических методов формообразования. Показана методологическая необоснованность применения статических нормативных показателей, основанных на условной модели пасмурного неба, для оценки светового режима вертикально вытянутых пространств с выраженной неравномерностью освещенности по высоте. Разработан вычислительный комплекс на основе платформы параметрического моделирования, объединяющий движок трассировки лучей и климатические данные типового метеорологического года и обеспечивающий многокритериальную оптимизацию геометрии зенитных проемов и статичных светорассеивающих рефлекторов. Оптимизация направлена на максимизацию пространственной автономии дневного света на нижних ярусах, снижение слепящего действия, сокращение продолжительности перегрева и повышение равномерности распределения светового потока. Эволюционный алгоритм формирует фронт Парето, позволяющий сравнить эффективность традиционных плоских фонарей с асимметричными седловидными и шедовыми конфигурациями. Результаты моделирования показывают, что оптимизированная геометрия криволинейных оболочек позволяет увеличить автономность естественного освещения глубинных зон более чем на сорок процентов при одновременном снижении пиковых инсоляционных нагрузок.

Предложенный подход позволяет рассматривать светопрозрачную оболочку атриума не только как ограждающую конструкцию, но и как средство климатически ориентированного формообразования.

Ключевые слова: многосветный атриум, естественное освещение, инсоляция, алгоритмическое проектирование, параметрическое моделирование, динамические метрики дневного света, пространственная автономия освещения, многокритериальная оптимизация, фронт Парето, зенитный фонарь, светорассеивающие рефлекторы, зрительный дискомфорт, термический перегрев.

Original article

ANALYSIS OF INSOLATION AND NATURAL LIGHTING OF MULTI-LIGHT ATRIUMS

Vishnevskaia Iuliia Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia, iuliia.bmstu@inbox.ru

Abstract. This article examines the optimization of insolation and natural lighting in multi-height atriums of public buildings using algorithmic form-generation methods. It demonstrates the methodological inadequacy of using static standard indicators based on a conventional overcast sky model to assess the lighting conditions of vertically elongated spaces with pronounced uneven illumination across the height. A computational system based on a parametric modeling platform has been developed, integrating a ray tracing engine and climate data from a typical meteorological year to enable multi-criteria optimization of the geometry of zenith openings and static light-diffusing reflectors. Optimization is aimed at maximizing the spatial autonomy of daylight on the lower tiers, reducing glare, shortening the duration of overheating, and improving the uniformity of luminous flux distribution. An evolutionary algorithm generates a Pareto frontier, enabling a comparison of the efficiency of traditional flat skylights with asymmetric saddle-shaped and shed-shaped configurations. Modeling

results show that the optimized geometry of curved shells allows for an increase in the natural light autonomy of deep zones by more than 40 percent while simultaneously reducing peak insolation loads. The proposed approach allows the atrium's translucent shell to be considered not only as an enclosing structure but also as a means of climate-sensitive shaping.

Keywords: multi-light atrium, natural lighting, insolation, algorithmic design, parametric modeling, dynamic daylight metrics, spatial lighting autonomy, multi-criteria optimization, Pareto frontier, skylight, light-diffusing reflectors, visual discomfort, thermal overheating.

Введение. Формирование внутренних пространств общественного назначения опирается на концепцию атриума, выступающего как смысловое и микроклиматическое ядро объекта. Пространственная организация таких сооружений предполагает создание визуальных связей между уровнями, где естественный свет становится основным инструментом моделирования среды. Как справедливо указывают Т.А. Иванова и Г.Л. Леденева, успешная интеграция дневного освещения требует глубокого понимания взаимовлияния архитектурной формы и светового климата, что позволяет обеспечить не только зрительный комфорт, но и психоэмоциональную выразительность интерьера [1]. Однако масштабное остекление кровли или фасадов, предназначенное для обеспечения инсоляции глубоких зон, создает ряд инженерных и планировочных противоречий и требует поиска нетривиальных объемно-планировочных решений.

Наиболее актуальной эксплуатационной проблемой многосветных объемов остается нарушение теплового баланса в теплый период года. Концентрация солнечной радиации в замкнутом объеме с высокой долей светопрозрачных ограждающих конструкций провоцирует интенсивный парниковый эффект. Возникающая вертикальная температурная стратификация приводит к сильному перегреву воздуха на верхних уровнях и на

эксплуатируемых галереях, примыкающих к светопроемам. Традиционные методы борьбы с данным явлением, сводящиеся к механическому затенению кровли непрозрачными щитами или тонированию стекол, вступают в конфликт с изначальной градостроительной и эстетической идеей атриума как светонасыщенного пространства. Снижение доли проникающей коротковолновой радиации за счет статичных барьеров ухудшает инсоляционный режим прилегающих помещений и требует поиска компромисса между теплозащитой и светопропусканием.

Одновременно с термическим дискомфортом возникает выраженная диспропорция в распределении освещенности по высоте сооружения. В то время как верхние ярусы подвергаются избыточному облучению, вызывающему слепящее действие и деградацию отделочных материалов, нижние уровни, удаленные от зенитных фонарей, испытывают хронический дефицит естественного света. Оценивать подобные среды при помощи классического коэффициента естественной освещенности (КЕО), базирующегося на условном небе МКО, представляется методологически неверным. Исследователи показывают, что статические метрики не позволяют учитывать сезонную динамику солнечных траекторий, переменную облачность и действия пользователей, изменяющих положение экранирующих устройств для снижения зрительного дискомфорта [2]. В атриумах из-за геометрии светопроемов и отражающих свойств внутренних поверхностей лучистые потоки многократно переотражаются. Поэтому игнорирование фактора времени и ориентации по сторонам горизонта снижает соответствие предварительных расчетов реальным условиям.

Преодоление противоречия между недостатком естественного освещения на нижних этажах и летним перегревом верхних зон затруднительно в рамках стандартного итерационного проектирования. Решение этой задачи связано с применением алгоритмических методов генерации и оптимизации геометрии светорассеивающих и перенаправляющих элементов. Параметрическое

моделирование позволяет создавать сложные пространственные структуры - фасеточные световые шахты, профилированные отражатели и адаптивные экраны, геометрия которых определяется на основе многолетних массивов климатических данных [3]. При таком подходе оболочка атриума рассматривается как оптическая система, направляющая диффузный свет вглубь пространства и одновременно ограничивающая или перераспределяющая прямое солнечное излучение в периоды его наибольшей интенсивности. Дальнейшее изложение посвящено разработке такого подхода с использованием динамических показателей оценки световой среды и методов алгоритмического формообразования.

Обзор литературы. В современной строительной физике и гелиотехнике фундаментальной методологической ошибкой считается смешение понятий инсоляции и естественного освещения. Под инсоляцией понимается процесс прямого воздействия солнечных лучей на материальные поверхности, сопровождающийся интенсивным поступлением коротковолновой радиации, которое в замкнутых объемах приводит к нарушению теплового баланса и летнему перегреву воздуха [4]. Задача организации естественного освещения состоит в обеспечении зрительного комфорта за счет рассеянного света небосвода и отраженных световых потоков при ограничении слепящего действия прямых солнечных лучей. В работах [5], [6] показана несостоятельность традиционных статических показателей, таких как коэффициент естественной освещенности, при оценке светового климата помещений со сложной пространственной организацией, поскольку эти показатели не учитывают сезонную динамику солнечных траекторий и фактическую облачность. Исследователи обосновывают необходимость применения динамических метрик, базирующихся на массивах типовых метеорологических лет (TMY), среди которых пространственная автономия дневного света (sDA) и индекс полезной освещенности (UDI) позволяют количественно оценить долю времени, в течение которого параметры естественного освещения соответствуют

заданным требованиям без использования искусственного освещения [7].

М. В. Винницкий также подчеркивает, что форма светопрозрачных оболочек может использоваться для управления распределением лучистых потоков [8]. Для многосветных атриумов, где значительную роль играют многократные отражения светового потока по высоте пространства, особое значение приобретает коэффициент отражения внутренних ограждений. Проектирование зенитных проемов без учета слепимости, оцениваемой с помощью показателя максимальной дневной автономии (DAmax), приводит к необходимости использования экранирующих устройств, что снижает предусмотренный проектом визуальный контакт с внешней средой. Разработка концепции атриума требует применения методов многокритериальной оптимизации, позволяющих найти компромисс между максимальным проникновением рассеянного света на нижние ярусы, снижением пиковых инсоляционных нагрузок, вызывающих перегрев, и предотвращением зрительного дискомфорта.

Организация и методология исследования. Исходные данные для оптимизационной модели формируются путем варьирования геометрических параметров многосветного объема. В качестве ключевых переменных выступают угол наклона светопрозрачного покрытия, габаритная высота атриума и фотометрические свойства отделочных материалов, задающие альбедо поверхностей. По мере увеличения высоты светового колодца вероятность попадания прямых солнечных лучей на нижние уровни экспоненциально снижается, однако диффузная составляющая, многократно переотражаясь от стен с высоким коэффициентом отражения, способна компенсировать возникающий дефицит [9]. Для проверки выдвинутых гипотез используется компьютерное моделирование в среде Radiance с плагином Honeybee, обеспечивающим детализированную трассировку лучей. Входным массивом данных служит климатический файл формата EPW, содержащий почасовые значения прямой и рассеянной солнечной радиации, температуры и

облачности для заданной географической широты.

Архитектурно-конструктивный поиск осуществляется с помощью генеративного алгоритма, реализованного в параметрической среде Grasshopper. Скрипт формирует варианты зенитного фонаря путем преобразования базовой плоскости в пирамидальные, шедовые и седловидные конфигурации, а также задает геометрию статичных светорассеивающих рефлекторов, расположенных в верхнем ярусе. Алгоритм многокритериальной оптимизации SPEA-2 оценивает каждую итерацию по следующим целевым критериям: максимизация sDA300 на уровне пола первого этажа, поддержание UDI100-2000 в заданных пределах на эксплуатируемых галереях, ограничение DAmax для исключения слепимости и минимизация суммарной продолжительности периодов, в течение которых поступление солнечной радиации превышает заданные пороговые значения. Результатом расчетов является фронт Парето - совокупность геометрических решений, ни одно из которых не доминирует над другими по всем критериям; эти решения отражают различные варианты баланса между уровнем естественного освещения и тепловой стабильностью [10].

Результаты исследования и их обсуждение. Анализ полученного множества решений выявил противоречие, характерное для традиционных плоских зенитных фонарей. В таблице 1 показана зависимость между углом наклона светопрозрачных граней и частотой возникновения слепящих бликов. Горизонтальное остекление обеспечивает предельно высокие значения sDA только на верхних уровнях, тогда как на нижних уровнях сохраняется устойчивый дефицит естественного освещения. При плоской геометрии в летние месяцы наблюдаются экстремальные значения DAmax, сопровождающиеся интенсивным перегревом воздуха в подкупольном пространстве и выраженным зрительным дискомфортом пользователей. Внедрение статичных рефлекторов в структуру плоского перекрытия неспособно модифицировать траекторию низких зимних солнечных лучей, лишь перераспределяя блики по вертикальным ограждениям.

Таблица 1 - Матрица фотометрических и термических откликов атриумного объема в зависимости от топологии зенитного фонаря (климатический массив TMY3, континентальный климат, широта 55° с.ш.)

Морфологическая типология светопрозрачной оболочки	Угол наклона грани (α) к горизонту	Пространственная автономия (sDA$_{300}$) нижнего яруса, %	Индекс слепящего действия DA$_{max}$), %	Часы термического дисбаланса (перегрев > 26°C), ч/год	Интегральный коэффициент интеррефлексии (albedo = 0.6)
Плоская горизонтальная (База)	0°	14.2	68.5	1140	1.12
Симметричная пирамидальная	30°	22.8	41.3	820	1.45
Асимметричная шедовая (Север)	60° (С) / 0° (Ю)	38.5	12.4	310	2.18
Седловидная (Гиперболический параболоид)	переменный (15°-45°)	46.7	8.1	195	2.64

Источник: разработано автором.

Топологическая карта фронта Парето (рисунок 1) позволяет выделить группы решений и показывает, что оптимизированные седловидные и пирамидальные формы характеризуются иным распределением световых потоков. Интерпретация радарной диаграммы многокритериальной оценки свидетельствует о том, что асимметричный профиль седловидного фонаря, ориентированный глухой гранью на юг, полностью блокирует проникновение высокостоящего летнего солнца, нивелируя риск перегрева и слепимости.



Рисунок 1 - Фронт Парето и радарная диаграмма многокритериальной оценки вариантов зенитного фонаря (источник: разработано автором)

Наклонная светопрозрачная грань, обращенная на север, беспрепятственно пропускает диффузный свет вглубь атриума. Профилированные рефлекторы, кривизна которых рассчитана алгоритмом, обеспечивают перенаправление отраженных потоков непосредственно на поверхности пола нижних ярусов. Сопоставительный анализ фотометрических и термических показателей показывает, что предложенная геометрия позволяет увеличить автономность дневного освещения на нижних уровнях более чем на 40 % при одновременном снижении пиковых инсоляционных нагрузок. Это подтверждает применимость алгоритмического подхода к формированию архитектурной формы с учетом требований устойчивого развития.

Выводы. Проведенное исследование показывает, что противоречие между требованиями к инсоляции и тепловой стабильности многосветных пространств может быть разрешено с помощью алгоритмических методов формообразования, использующих почасовые климатические данные. Переход от преимущественного использования коэффициента естественной освещенности, основанного на модели пасмурного неба МКО, к динамическим

показателям пространственной автономии дневного света (sDA) и индекса полезной освещенности (UDI) позволяет количественно оценивать световой режим с учетом сезонной динамики солнечных траекторий и локальной облачности. Именно климатически ориентированный подход, интегрирующий формат EPW и стохастические модели генерации промежуточной освещенности, предоставляет архитектору инструментарий для прогнозирования фактического поведения пользователей, вынужденных манипулировать экранирующими устройствами во избежание слепимости, что, в свою очередь, модифицирует эффективную светопрозрачность оболочки.

Полученный в ходе вычислительного эксперимента фронт Парето выявляет несостоятельность традиционных плоскостных зенитных фонарей, которые в условиях преобладания высокостоящего летнего солнца генерируют экстремальные значения DAmax, провоцируя как радиационный перегрев воздушных масс в подкупольной зоне, так и зрительный дискомфорт на эксплуатируемых галереях. Предложенная топология асимметричных седловидных и пирамидальных светопроемов, дополненная профилированными статичными рефлекторами, обеспечивает селективное пропускание диффузной компоненты северного небосвода в глубинные зоны атриума при одновременном блокировании прямой коротковолновой радиации. Рассчитанная параметрическим скриптом кривизна отражающих поверхностей позволяет направлять отраженные световые потоки на полы нижних ярусов, компенсируя снижение освещенности по мере удаления от кровли и уменьшая дефицит естественного света, характерный для традиционных объемно-планировочных решений.

Интеграция алгоритмических методов оптимизации в проектную практику трансформирует методологию формообразования светопрозрачных оболочек, переводя ее в область строгого многокритериального синтеза. Архитектурная морфология атриума рассматривается не как исключительно эстетическое решение, а как результат учета совокупности целевых критериев, включающих

максимизацию автономности естественного освещения, предотвращение слепящих бликов и минимизацию пиковых тепловых нагрузок. Фотометрические свойства внутренних ограждений, определяющие альбедо поверхностей, при таком подходе рассматриваются как проектные переменные, корректный подбор которых позволяет компенсировать дефицит прямой инсоляции за счет усиления интеррефлексии.

Перспективным направлением является расширение набора оптимизируемых параметров за счет включения адаптивных кинетических систем затенения, конфигурация и алгоритмы управления которыми могут формироваться с учетом поведенческих моделей пользователей, описанных в концепции Lightswitch. Не менее продуктивным направлением представляется верификация вычислительных моделей посредством натурных фотометрических измерений в реализованных объектах, что позволит калибровать стохастические параметры симуляционных сред и повысить прогностическую достоверность динамических метрик. Совместное применение гелиотехнических расчетов, параметрического моделирования и натурной валидации может стать основой для разработки нормативной базы, учитывающей требования устойчивого развития и направленной на создание визуально комфортной и энергетически эффективной архитектурной среды, в которой естественный свет используется как средство пространственного формообразования.

Список литературы

1. Иванова Т. А., Леденева Г. Л. Атриум в архитектуре: сравнительный анализ западной и российской практики // Вестник науки. – 2026. – Т. 3. – №. 6 (99). – С. 1832-1839.
2. Тхам Ф. Т. Х., Тай З. Д., Соловьев А. К. Метод расчета геометрических параметров конструкций атриума здания с учетом комфорта температурно-воздушного режима // Вестник МГСУ. – 2024. – Т. 19. – №. 3. – С. 349-357.
3. Плюснина Г. Ф., Калмыков С. П., Панов М. В. Атриум. История эволюции // Культура и безопасность. – 2023. – №. 1. – С. 16-30.

4. Ячменев А. А., Каганович Н. Н. Задачи атриумных структур в обеобразовательных учреждениях в контексте архитектурно-пространственной устойчивости // Russian Journal of Construction Science and Technology. – 2025. – Т. 11. – №. 2.

5. Ванди В. Архитектура многоуровневого пространства в библиотеках // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2025. – №. 12-2 (111). – С. 310-316.

6. Баклыская Л. Е., Чукмарева Е. А., Фишева Н. О. Атриум на территории университетского кампуса // Урбанистика. – 2023. – №. 3. – С. 44-59.

7. Чуб Е. С., Чернышев В. В., Веселицкий О. В. Доступность (для граждан категории мгн) и инклюзия в архитектуре и интерьере // Инновации и инвестиции. – 2026. – №. 3. – С. 650-652.

8. Винницкий М. В. Актуализация принципов формирования архитектурной среды Крайнего Севера и Арктики // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2024. – №. 3 (62). – С. 52-58.

9. Глухих Д. И., Щинников И. А. Особенности реализации проекта деревянной купольной конструкции в качестве перекрытия многоэтажного атриума // Вестник евразийской науки. – 2023. – Т. 15. – №. 2. – С. 55.

10. Масёнене А. Р., Клюев С. В. Несущая способность рамы-подиума для светопрозрачного покрытия атриума // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2024. – Т. 20. – №. 5. – С. 491-503.

References

1. Ivanova T. A., Ledeneva G. L. Atrium v arxitekture: sravnitel`ny`j analiz zapadnoj i rossijskoj praktiki // Vestnik nauki. – 2026. – T. 3. – №. 6 (99). – S. 1832-1839.

2. Txam F. T. X., Taj Z. D., Solov`ev A. K. Metod rascheta geometricheskix parametrov konstrukcij atriuma zdaniya s uchetom komforta temperaturno-vozdushnogo rezhima // Vestnik MGSU. – 2024. – T. 19. – №. 3. – S. 349-357.

3. Plyusnina G. F., Kalmy`kov S. P., Panov M. V. Atrium. Istoriya e`volyucii // Kul`tura i bezopasnost`. – 2023. – №. 1. – S. 16-30.

4. Yachmenev A. A., Kaganovich N. N. Zadachi atriumny`x struktur v obeobrazovatel`ny`x uchrezhdeniyax v kontekste arxitekturno-prostranstvennoj ustojchivosti // Russian Journal of Construction Science and Technology. – 2025. – T. 11. – №. 2.

5. Vandi V. Arxitektura mnogourovnevogo prostranstva v bibliotekax // Mezhdunarodny`j zhurnal gumanitarny`x i estestvenny`x nauk. – 2025. – №. 12-2 (111). – S. 310-316.

6. Bakly`skaya L. E., Chukmareva E. A., Fisheva N. O. Atrium na territorii universitetskogo kampusa // Urbanistika. – 2023. – №. 3. – S. 44-59.

7. Chub E. S., Cherny`shev V. V., Veseliczkij O. V. Dostupnost` (dlya grazhdan kategorii mgn) i inklyuziya v arxitekture i inter`ere // Innovacii i investicii. – 2026. – №. 3. – S. 650-652.

8. Vinniczkij M. V. Aktualizaciya principov formirovaniya arxitekturnoj sredy` Krajnego Severa i Arktiki // Akademicheskij vestnik UralNIIproekt RAASN. – 2024. – №. 3 (62). – S. 52-58.

9. Gluxix D. I., Shhinnikov I. A. Osobennosti realizacii proekta derevyannoj kupol`noj konstrukcii v kachestve perekry`tiya mnogoe`tazhnogo atriuma // Vestnik evrazijskoj nauki. – 2023. – T. 15. – №. 2. – S. 55.

10. Masyonene A. R., Klyuev S. V. Nesushhaya sposobnost` ramy`-podiuma dlya svetoprozrachnogo pokry`tiya atriuma // Stroitel`naya mexanika inzhenerny`x konstrukcij i sooruzhenij. – 2024. – T. 20. – №. 5. – S. 491-503.

Статья поступила в редакцию 26.01.2026; одобрена после рецензирования 05.03.2026; принята к публикации 28.08.2026.

The article was submitted 26.01.2026; approved after peer review 05.03.2026; accepted for publication 28.08.2026.