

Способы повышения энергоэффективности кровли за счет использования купольных светопрозрачных решений

В.Т. Пупия

ООО «Арх-Консалт», Москва

Аннотация: Общей тенденцией возведения уникальных зданий и сооружений является высокая степень остекления, так, что вся оболочка объекта может представлять собой светопрозрачную конструкцию. Объектом исследования являлись светопрозрачные кровли, решающие проблему повышения архитектурной выразительности объекта и его энергоэффективности. Методами исследования служили теоретико-эмпирические методы, ретроспективные исследования научно-практических результатов. Систематизированы представления о светопрозрачных кровельных конструкциях и материалах, в том числе, купольных кровлях, с учетом вопросов энергоэффективности и микроклимата объекта. Обобщены современные архитектурные, конструктивные, материаловедческие аспекты развития кровельных светопрозрачных конструкций; определены способы повышения энергоэффективности светопрозрачной кровли. Результаты аналитического обзора представляют интерес для развития теории и практики архитектуры энергоэффективных объектов со светопрозрачной кровлей.

Ключевые слова: Архитектура, светопрозрачная кровля, сетчатая конструкция, оболочка, естественное освещение, купол, энергоэффективность, микроклимат.

Введение

Современное строительство спортивных сооружений, аэропортов, концертных залов, оранжерей и т.д., отличается разнообразием форм объектов и креативностью архитектурных решений. Общей тенденцией в возведении уникальных зданий и сооружений является высокая степень остекления, так, что вся оболочка объекта может представлять собой светопрозрачную конструкцию. Одно из направлений повышения архитектурной выразительности здания, одновременно решающее проблему естественного освещения внутреннего пространства - возведение светопрозрачных кровель (СК) [1]. Базисом архитектуры СК являются пространственные оболочки, обычно в формате легкой сетчатой конструкции, соединяемой с несущими элементами объектов [2, 3]. Заполнение сетчатых элементов преимущественно производится с

применением стеклопакетов, но возможно использование и полимерных листовых, сотовых и пленочных материалов [4].

Архитектурные решения объектов со СК отличаются разнообразием и могут включать как плоские кровли, так и купольные решения. При этом общее наименование «купол» в современной архитектуре может соответствовать не только полусфере, но и другим фигурам сложной формы (эллипс, парабола и т. д.), служащих источником формирования «стеклянной коры» [5]. Светопрозрачные элементы заполнения купольных сетчатых конструкций могут сочетаться с непрозрачными элементами, теплоизоляционными сэндвич-панелями с различной облицовкой, солнечными панелями. При этом отмечается важность обеспечения энергоэффективности объектов, через повышение энергоэффективности ограждающих конструкций [6], в том числе, кровельных. Что касается купольных решений, то подчеркивается экономичность, энергоэффективность, высокая несущая способность купольной кровли, относительно традиционных прямоугольных форм [7].

Анализ научно-практических исследований свидетельствует о наличии отдельных публикаций, демонстрирующих: архитектурные решения уникальных зданий со светопрозрачной оболочкой; варианты конструктивных решений устройства СК и материалов сетчатых и светопрозрачных конструкций; преимущества и недостатки купольных конструкций СК; результаты расчетов прочности и напряженно-деформируемого состояния элементов СК; разработки энергоэффективных светопрозрачных материалов. Однако остаются дискуссионными вопросы обеспечения энергоэффективности СК, что обуславливает актуальность данного исследования. Цель - представление способов повышения энергоэффективности кровли за счет архитектурных купольных решений и заполнения сетчатых оболочек купола светопрозрачными материалами.

Материалы и методы исследования

Методами исследования служили теоретико-эмпирические методы и ретроспективные исследования научно-практических результатов. Информационной базой исследования служили научные публикации российских и зарубежных авторов, в том числе в высокорейтинговых журналах. Примеры архитектурных решений уникальных зданий со светопрозрачной оболочкой приведены в трудах Евтушенко А.И. и Еремеева П.Г с соавторами, Касьянова Н.В. и многих других; варианты материалов сетчатых и светопрозрачных конструкций обобщены в публикациях Семеновой Э.Е. и Мулюковой А.Ф. с соавторами; преимущества и недостатки купольных конструкций СК исследуются Поповой М.И., Давыдовой Е.И, Абрамяном С.Г. с коллегами и т.д.

Примеры использования СК в современной западной архитектуре обобщены Belis J., Louter C., Nielsen J.H., Schneider J.; Engelmann M., Weller V. Дизайн светопрозрачных элементов, результаты расчетов прочности элементов стеклянной сферы, диагностики и прогнозирования напряженно-деформируемого состояния каркаса и стекла приводятся в трудах Feldmann M., Froli M., Hayek I.E., Laccone F., Martens, K. и т.д. Варианты повышения энергоэффективности остекления отражены в публикациях Bülow-Hübe H., Carmody J., Cheong C.H., Lee E.A., Warwick M.E.A. и др.; примеры решений по обеспечению энергоэффективности и поддержанию микроклимата объекта - в трудах Beghi A., Schibuola L., Brittle J.P., Lim Y.-h.

Результаты и обсуждение

Способ повышения энергоэффективности за счет реализации купольной формы кровли.

Относительно прямоугольных конструкций купольные решения сферической формы имеют наименьшее соотношение наружной площади стен и внутреннего объема сооружения. Меньшая общая площадь стен

обеспечивает сокращение энергозатрат на поддержание микроклимата и повышение энергоэффективности сооружения. Также у купольных конструкций, благодаря аэродинамике пограничного с куполом воздушного слоя, наблюдаются пониженные теплотери при ветровых нагрузках вследствие меньшего сопротивления потока воздуха при обгании купола.

Внутренняя поверхность купольного решения способствует естественной циркуляции воздуха, воздухообмену и выравниванию температурных полей в помещениях, что снижает расходы на отопление и вентиляцию до 35%, относительно прямоугольных решений [7]. Известно, что поверхность сферы меньше поверхности куба на четверть (при равном объеме), соответственно материалов на такие поверхности требуется меньше на $\frac{1}{4}$; каркас купола требует на 60-70% меньше конструктивных элементов, что сокращает число мостиков холода и обеспечивает 5-10% дополнительной экономии энергии и до 40% экономии времени монтажа [8].

Также отмечают: лучшее распространение звука, отсутствие резонирования, меньшее проникновение внешнего шума, мягкость распределения световых потоков за счет многократного отражения/поглощения гранями купола, стойкость к вихревым, сейсмическим, волновым воздействиям. Бесшовное выполнение купольной СК минимизирует потери через швы, характерные для конструкций другой формы [7].

Каркас купольной кровли можно охарактеризовать как сетчатую оболочку выпуклого типа, представляющую собой решетчатую конструкцию, которая выполняется из металлических, древесных, пластиковых и композитных материалов. К преимуществам сетчатых каркасов относят простоту монтажа и сборки; быстрые сроки возведения; меньшую потребность в персонале и технике для их устройства; отсутствие потребности в несущих конструкциях, что позволяет свободно планировать

подкупольное пространство; устойчивость к ветровым нагрузкам в связи с наличием наклонных компонентов и т. д. [8, 9].

Способ повышения энергоэффективности за счет использования светопрозрачных материалов в куполе.

Светопрозрачные оболочки кровли способствуют архитектурной выразительности объекта, воспринимаемого воздушным, привлекательным, футуристическим. Одновременно с выразительным дизайном СК решает проблему естественного освещения внутреннего пространства; обеспечивает герметичность и минимизацию ресурсов на обслуживание и ремонт кровли [1]. При этом важным ограничением использования СК остается ее высокая стоимость, а также возможность развития тепличного эффекта и восприятия помещения, как перегретого, что требует автоматического открывания элементов крыши [2].

В СК преимущественно используются стеклянные панели в каркасе, которые опираются на конструкцию из балок, и могут иметь форму прямоугольника, треугольника, трапеции [3]. Опора стеклопанелей выполняется эластичной для адаптации стекла к температурным расширениям, а разделительные силиконовые профили используются для исключения контакта стекла с металлом и другим стеклом.

Конструкция СК должна предусматривать возможности для вентиляции, дымоудаления и дренажа конденсата, а также устранения снежного покрова и льда с кровли, что достигается устройством подвесных воздухоотводов механического и автоматического действия; механической чисткой и подогревом стекол; использованием СК с повышенным уклоном и т.д. [2]. В малоуклонных СК следует предусмотреть конструкции, препятствующие водопротеканию и способствующие водоотведению влаги с поверхности и из-под кровельного пространства, в виде прижимных

планок, герметизирующих лент, уплотнителей с канавками; при необходимости возможна интеграция открывающихся окон в СК [10].

В качестве примера светопрозрачного купольного решения можно отметить амфитеатр концертного комплекса парка «Зарядье», являющийся крупнейшей большепролетной конструкцией, в виде стеклянной коры в металлокаркасе. В стеклянной оболочке установлены солнечные батареи, в триплекс-стекла внедрены фотоэлементы, которые, однако, не занимают всю площадь стеклопакета и не препятствуют светопропусканию. Поддержание микроклимата в зимнее время обеспечивается инженерными системами подачи подогретого воздуха; в летнее время производится охлаждение и увлажнение воздуха; происходит автоматизированное открытие фрагм при повышении температуры.

Проекты с раздвижными элементами купольных СК также позволяют значительно увеличить естественную освещенность и обеспечивают открытие пространств до 80% [11]. Ограничениями к широкому использованию светопрозрачной купольной кровли в архитектуре остаются: высокая стоимость, сложность проектирования и расчетов криволинейных поверхностей, трудности прогнозирования изменений параметров внутренней и внешней среды. Однако современный уровень цифровизации, развитие программных продуктов проектирования и моделирования зданий и сооружений, инновации в сфере энергоэффективных стекольных и каркасных материалов, возможности автоматизированного регулирования параметров микроклимата, позволяют снизить ограничения и использовать преимущества светопрозрачных купольных решений.

Способ повышения энергоэффективности за счет светопрозрачных материалов с повышенным сопротивлением теплопередаче.

Решение вопросов создания энергоэффективных зданий и сооружений со СК требует учета природно-климатических факторов на территории их

возведения, в частности инсоляции, ветровых, снеговых, дождевых воздействий. Одним из направлений обеспечения энергоэффективности СК является использование стекла с повышенным сопротивлением теплопередаче и многослойного остекления.

Однако, например, трехслойные светопрозрачные решения в раздельно-спаренных переплетах обладают повышенным сопротивлением теплопередаче, составляющим $0,46-0,6 \text{ м}^2 \times \text{К/Вт}$, но, закономерно, снижают поступление естественной инсоляции в подкупольное пространство [12]. Также теплотери будут выше в зависимости от компоновки стекол, например, теплотери в тройных стеклопакетах будут выше, чем в остеклении 1+2 с двойным стеклопакетом во внутренней раме.

Известен подход к снижению числа стекол посредством использования энергоэффективных стекол с напылениями, уменьшающими излучательные потери через остекление и снижающими стоимость остекления на 18-25% [13]. Так, пониженными показателями эмисситента обладают К-стекла с твердым металлооксидным покрытием и I-стекла с мягким напылением. I-стекла получают путем нанесения на флоат-стекло низкоэмиссионного покрытия окислов металлов методом магнетронного распыления. Использование энергоэффективного остекления относительно двойного традиционного остекления составляет до $100-150 \text{ кВтч/м}^2$ в год [14].

Применение двойного остекления с затеняющей пленкой и дифференцированной отражательной способностью поверхностей позволяет снизить затраты на охлаждение подкупольного пространства до 60%, на электроэнергию до 24% [15]. Повышение энергоэффективности возможно за счет заполнения газами (аргоном, ксеноном, криптоном и их смесями) межстекольного объема, взамен воздуха. Известны решения, сочетающие низкоэмиссионные пленочные слои и заполнение газом межстекольного объема, что снижает лучистый теплообмен и способствует получению более

шумоизолированных подкровельных помещений. В регионах с повышенной инсоляцией перспективно использование светопрозрачных стеклянных решений с заполнением из диоксида кремния, что снижает теплопередачу на 63% и сокращает пропускание света на 30% [16]. В жарком климате эффективно устройство систем затемнения СК снижающих затраты на охлаждение до 61%, что, однако, значительно снижает уровень освещенности внутреннего пространства [15].

Современные архитектурные решения в части СК не ограничиваются стеклянными материалами. Распространение получают светопрозрачные кровельные конструкции с применением мембранных подушек из пленки ETFE (этилентетрафторэтилен, фторопласт-40), позволяющие формировать любые криволинейные формы в сочетании с железобетонными несущими системами. Использование пленок ETFE перспективно при возведении большепролетных, архитектурно-выразительных объектов свободной планировки [16].

Устройство СК играет важную роль в создании зданий концепции Energy 3, когда объект может производить энергии больше, чем затрачивает, за счет систем аккумулирования и передачи энергии и средств автоматизированного контроля микроклимата. В таком случае СК интегрируется с солнечными панелями и одновременно обеспечивает невесомость и энергоэффективность кровельного решения. Фотогальванические модули могут решать задачи, как улавливания энергии солнца, так и затенения внутреннего пространства, а также сочетаться с системами отопления и вентиляции, в том числе, с рекуперацией тепла.

Заключение

На основании анализа научно-практических результатов разработки, возведения и эксплуатации светопрозрачных кровельных конструкций предложены способы повышения энергоэффективности кровли за счет

использования купольных светопрозрачных решений. Способы отражают преимущества купольных конструкций относительно традиционных архитектурных форм кровли, возможности повышения энергоэффективности за счет остекления купола и применения светопрозрачных материалов с пониженной теплопроводностью.

Сочетание предлагаемых способов, основанных на архитектурно-конструктивных и материаловедческих решениях, в сочетании с автоматизированными системами, обеспечивает рост энергоэффективности объекта с одновременным поддержанием микроклимата.

Результаты исследования представляют интерес для развития теории и практики архитектуры в части кровельных конструкций из светопрозрачных материалов. Оценка практической реализации предлагаемых способов используется автором при экспертизе архитектурных проектов в рамках ООО «Арх-Консалт».

Литература

1. Евтушенко А.И., Карамышева А.А., Колотиенко М.А., Брижанов Е.А. Инновационные разработки в области конструктивных и архитектурных решений светопрозрачных кровель аэропортов из стеклянных материалов // Инженерный вестник Дона, 2019 № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5563.
2. Еремеев П.Г., Ведяков И.И., Королева Е.А. Светопрозрачные крыши с использованием стекла для большепролетных покрытий // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 6. С. 23-28.
3. Laccone F., Malomo L., Froli M., Cignoni P., Pietroni N. Automatic design of cable-tensioned glass shells // Comput. Graph. Forum. 2020. 39(1). pp. 260–273. DOI:10.1111/cgf.13801.



4. Семенова Э.Е., Логвинова Е.О. Анализ применения современных светопрозрачных кровельных материалов // Высокие технологии в строительном комплексе. 2018. № 2. С. 49-54.

5. Мулюкова А.Ф., Стрелец К.И., Корнеева Е.А. Классификация и критерии оптимизации конструктивных решений светопрозрачной купольной кровли // Неделя науки ИСИ: сб. материалов Всеросс. конф. СПб.: Политех-пресс, 2021. – С. 166-169.

6. Малинина Е.В., Гиясова И.В., Васильев М.Д. Определение энергоэффективности зданий поликлиник г. Москвы при их реконструкции // Инженерный вестник Дона, 2023, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/8360.

7. Попова Е.И., Бащенко Н.Н., Сорвачёв А.И., Чуприна О.Д. Поверхность купола как элемент энергоэффективности ограждающих конструкций // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2017. № 2(20). С. 30-35.

8. Есипова А.А. Применение геодезических куполов в строительстве: преимущество и недостатки // Наука и современность. 2015. № 38. С. 8-11.

9. Касьянов Н.В. Парк "Зарядье" - новая архитектурно-ландшафтная реальность Москвы // Современная архитектура мира. 2019. № 1(12). С. 227-250.

10. Здания и сооружения со светопрозрачными фасадами и кровлями. Теоретические основы проектирования светопрозрачных конструкций. С-Петербург: Инженерно-информационный Центр Оконных Систем, 2012. 400 с.

11. Козырев С.В. Виды раздвижных покрытий, их достоинства и недостатки при проектировании // Инновационное развитие регионов: потенциал науки и современного образования: материалы III нац. науч.-практ. конф. 2020. С. 243-247.



12. Мулюкова А.Ф. Повышение энергоэффективности светопрозрачных конструкций // Точная наука. 2019. № 67. С 6-21.

13. Давыдова Е.И., Гнам П.А., Тарасова Д.С. Светопрозрачные конструкции и методы повышения их энергоэффективности // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 5(32). С. 112-128.

14. Karlsson J., Roos A. Annual energy window performance versus glazing emittance -the relevance of very low emittance values // Thin Solid Films. 2001. No 392. pp. 345-348.

15. Cheong C.H, Kim T., Leigh S.-B. Thermal and Daylighting Performance of Energy-Efficient Windows in Highly Glazed Residential Buildings // Sustainability 2014. No 6. pp. 7311-7333.

16. Абрамян С.Г., Оганесян О.В., Фарниев Д.К. Светопрозрачные покрытия уникальных зданий и сооружений // European Research. 2016. № 6(17). С. 29-31.

References

1. Evtushenko A.I., Karamysheva A.A., Kolotienko M.A., Brizhanov E.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019 № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5563.

2. Ereemeev P.G., Vedjakov I.I., Koroleva E.A. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2019. № 6. pp. 23-28.

3. Laccone F., Malomo L., Froli M., Cignoni P., Pietroni N. Comput. Graph. Forum. 2020. 39(1). pp. 260–273. DOI:10.1111/cgf.13801.

4. Semenova Je.E., Logvinova E.O. Vysokie tehnologii v stroitel'nom komplekse. 2018. № 2. pp. 49-54.

5. Muljukova A.F., Strelec K.I., Korneeva E.A. Nedelja nauki ISI : sb. materialov Vseross. konf. SPb.: Politeh-press, 2021. – pp. 166-169.

6. Malinina E.V., Gijasova I.V., Vasil'ev M.D. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/8360.



7. Popova E.I., Bashhenko N.N., Sorvachjov A.I., Chuprina O.D. Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta. 2017. № 2(20). pp. 30-35.
8. Esipova A.A. Nauka i sovremennost'. 2015. № 38. pp. 8-11.
9. Kas'janov N.V. Sovremennaja arhitektura mira. 2019. № 1(12). pp. 227-250.
10. Zdanija i sooruzhenija so svetoprozrachnymi fasadami i krovljami. Teoreticheskie osnovy proektirovanija svetoprozrachnyh konstrukcij [Buildings and structures with translucent facades and roofs. Theoretical foundations of designing translucent structures]. S-Peterburg: Inzhenerno-informacionnyj Centr Okonnyh Sistem, 2012. 400 p.
11. Kozyrev S.V. Innovacionnoe razvitie regionov: potencial nauki i sovremennogo obrazovanija: materialy III nac. nauch.-prakt. konf. 2020. pp. 243-247.
12. Muljukova A.F. Tochnaja nauka. 2019. № 67. pp. 6-21.
13. Davydova E.I., Gnam P.A., Tarasova D.S. Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniij i sooruzhenij. 2015. № 5(32). pp. 112-128.
14. Karlsson J., Roos A. Thin Solid Films. 2001. No 392. pp. 345-348.
15. Cheong S.H, Kim T., Leigh S.-B. Sustainability 2014. No 6. pp. 7311-7333.
16. Abramjan S.G., Oganessian O.V., Farniev D.K. European Research. 2016. № 6(17). pp. 29-31.

Дата поступления: 29.10.2023

Дата публикации: 8.12.2023