

## Инновационные разработки в области конструктивных и архитектурных решений светопрозрачных кровель аэропортов из стеклянных материалов

*А.И. Евтушенко, А.А. Карамышева, М.А. Колотиенко, Е. А. Брижанов*

*Донской государственной технической университет*

**Аннотация:** в работе представлена характеристика лидирующих на рынке типов конструкций и видов материалов, применяемых при строительстве светопрозрачных кровель аэропортов со стеклянным заполнением, на основе анализа которой дана оценка перспективности технологии. Также описаны инновационные разработки, применимые в исследуемой области.

**Ключевые слова:** светопрозрачная кровля, триплекс, закаленное стекло, аэропорт, однокамерный стеклопакет, большепролетное покрытие, кровля, покрытие, светопрозрачная конструкция, стеклянная кровля, панорамная кровля, стеклянное покрытие.

Последние несколько лет на мировом рынке авиоперевозок наблюдается тенденция роста, обусловленная притоком числа пассажиров, увеличением количества стран с развивающейся экономикой, а также непосредственно процессом глобализации. Футуристические прогнозы о развитии инфраструктуры, становятся более реалистичными, как утверждает генеральный директор аэропорта Дубай, Пол Гриффитс. Уже сегодня аэропорт является не только площадкой для трансфера или ожидания рейса, маркетологи создают интегрированные центры торговли, развлечений и ресторанного бизнеса. На данный момент территория аэропорта Чанги в Сингапуре включает многоуровневый сад с водопадом, терминал в Гонкоге граничит с кинотеатром IMAX, что открывает перспективу возможностей для достижения экономического эффекта за счет оптимизации использования многоцелевых пространств [1]. В ответ растущим требованиям дизайна, развивается и строительная отрасль: для воплощения современных проектов применяются одни из самых передовых разработок в области строительных материалов и методов проектирования, наблюдается значительный рост

---

инвестиций. Многофункциональные проекты строительства терминалов зачастую предусматривают затраты до 1 млн. долл. в день, по утверждению ИТ-компании SITA Airport Management solution (Geneva, Switzerland). Одним из наиболее востребованных архитектурных приемов на сегодняшний день является применение светопрозрачных кровель. С эстетической точки зрения, данное решение позволяет объединить значительное по площади многоцелевое пространство в единое целое, а так же повысить уровень визуальной легкости конструкций. В перечень практических соображений конструирования кровли данного типа входит: повышение уровня естественной освещенности; расширение возможностей для совместной работы кровельного материала с современными технологиями выработки альтернативной энергии (на практике успешно применяется интеграция с солнечными панелями); повышение показателей износостойкости, стойкости к воздействию ультрафиолетового облучения и агрессивным химическим факторам, а также шумоизоляционных свойств. В аэропортостроении наиболее востребованы светопрозрачные кровли на основе стеклянных материалов или синтетических мембранных полотен.

Панорамные крыши для аэропортов классифицируются по материалу заполнения, по материалу профилей переплета и по конфигурации совместно работающих каркаса и покрытия кровли. К общим аспектам всех типов относятся предъявляемые требования к материалам, к примеру, все металлические элементы должны быть выносливы к воздействию окружающей среды, антикоррозийно надежны, а также сохранны на протяжении всего срока эксплуатации.

По типу соединения элементов заполнения в единое полотно панорамные кровли можно подразделить на самонесущие и работающие на переплете. Один из наиболее часто применяемых типов панорамной кровли для аэропорта - профильный с однокамерными стеклопакетами. В процессе

---

монтажа конструкций панорамных крыш недопустимо применение стандартного оконного металлопластикового профиля, в связи с повышенными прочностными требованиями. В строительстве аэропортов применяются стальные и алюминиевые профили для переплета. Стальные элементы отличаются высокой прочностью и возможностью применения при покрытии значительных пролетов. К отрицательным факторам относятся низкие антикоррозийные характеристики. Алюминиевые профили обладают меньшим весом, что сокращает воздействие на несущие конструкции и, как следствие, нагрузки, воспринимаемые основанием. Однако, при проектировании, необходимо учитывать значительную теплопроводность материала [2].

Все больший интерес вызывает исключение видимых крепежных элементов, в особенности стального переплета, при создании панорамной кровли аэропортов. Работоспособность самонесущих стеклянных покрытий обеспечивается их геометрией и не подразумевает устройства профильного каркаса [3]. Однако проектирование конструкций данного типа является предельно сложной задачей, так как требует детального расчета несущей способности, а также предъявляет высокие требования к технологии изготовления. Необходимо учитывать, что применение профиля позволяет минимизировать возможные трудности при создании компенсационных зазоров. Система крепежа должна быть тщательно спроектирована, с целью обеспечения установки стеклянных элементов в заданное положение без возникновения дополнительных напряжений или перекосов. Возникает также несогласованность эстетических и функциональных требований к системе, так как устройство светопрозрачных покрытий подразумевает применение уплотняющих и герметизирующих прокладок или герметиков. Соединение листов стекла между собой в полотно возможно с использованием крепежа

---

со стальной прокладкой (рис. 1.), который выигрывает в запасе прочности, при сравнении со стандартным подшипниковым соединением.

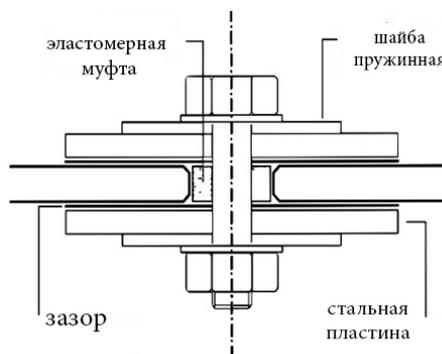


Рис. 1. – Узел стыка стеклянных панелей в соответствии с данными Sustainable Steel and Timber Constructions Master course at Czech Technical University (Prague, the Czech Republic)

В качестве несущей конструкции предлагается применение каркаса из горизонтальных стеклянных балок, что позволяет максимально визуально облегчить пространство, за счет отсутствия видимой системы крепежных элементов, при этом повысив общую жесткость [4-5]. Используется специальное болтовое крепление (рис. 2.), основанное на предварительно напряженных болтах с прослойкой из алюминиевого сплава, и параболических планках, стягиваемых в местах углового стыка.

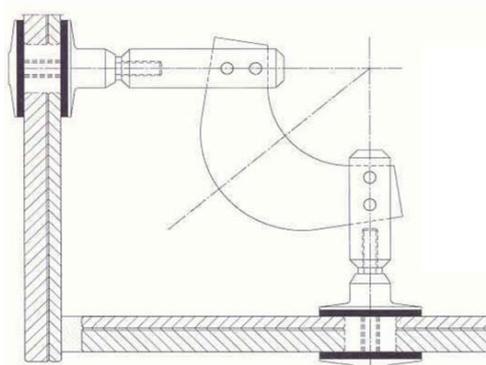


Рис. 2. – Узел примыкания стеклянных панелей в соответствии с данными Sustainable Steel and Timber Constructions Master course at Czech Technical University (Prague, the Czech Republic)

Однако длина пролета стеклянной балки имеет значительные ограничения, в связи с чем, применение технологии на данном этапе является спорным решением. Таким образом, конструирование самонесущих светопрозрачных покрытий в процессе строительства аэропортов сегодня является перспективным, но недостаточно усовершенствованным направлением развития технологии.

Разработки ведутся и в сфере применяемых материалов для заполнения. В процессе подбора технологии изготовления стекла для светопрозрачной кровли аэропорта необходимо учесть ряд основополагающих факторов: звукоизоляционные параметры, воздухопроницаемость, водонепроницаемость, сопротивление ветровой нагрузке, сопротивление тепловому воздействию, долговечность, высокая степень защиты от солнечной радиации [6]. В процессе проектирования необходимо учесть также высокую степень травматизма стеклянных кровель. В большинстве случаев при обнаружении дефектов требуется незамедлительная замена элементов покрытия, требующая значительных затрат на демонтаж, транспортирование и установку, в противном случае возникает риск обрушения. Известно, что в аэропорту Charles de Gaulle (Paris, France), при падении стеклянной конструкции на бетонном каркасе, погибли несколько человек.

Как следствие, наиболее востребованы материалы с повышенной травмобезопасностью, такие как триплекс и закаленное стекло. Комбинация данных материалов в однокамерном стеклопакете способна обеспечить не только безопасность при разрушении, но и снизить риск самопроизвольного растрескивания триплекса при нагреве в период яркого солнечного освещения, так как закаленное стекло обладает повышенной прочностью. Триплекс представляет собой несколько листов отшлифованного стекла, с пленочной прослойкой, препятствующей образованию осколков. Помимо

---

ударопрочности, данный материал обладает повышенными тепло- и звукоизоляционными характеристиками.

Наглядным примером является проект Istanbul Airport (Istanbul, Turkey). Специальное остекление общей площадью 200000 м. кв. создано компанией Sisecam (Tuzla, Istanbul, Turkey). Заявленная светопропускная способность многослойного материала 51%. Благодаря уникальной технологии «Sisecam Temperable Solar Control Low-E Glass», в помещение будет поступать 26-29% солнечной энергии.

Очевидно, что, в связи с растущей популярностью мембранных покрытий кровель из полимерных материалов, рынок стеклянной промышленности стремительно развивается, с целью сохранения конкурентоспособности. К примеру, кровля арочного типа The Munich Airport Center (Munich, German federal state of Bavaria) располагается на высоте 41 м. и выполнена из гнутого стекла с покрытием, произведенного компанией Guardian SunGuard (Michigan, USA). Пролет конструкции составляет 90 м. Дополнительное покрытие стекла обеспечивает баланс между необходимой светопропускной способностью и защитой от воздействия солнечной радиации.

Пленочные покрытия являются важным аспектом при выборе материала для заполнения. В процессе эксплуатации одного из терминалов Beijing Capital International Airport (Chaoyang District, People's Republic of China), было обнаружено, что система кондиционирования воздуха не обеспечивала необходимый климатический контроль в летний период. Комбинация высоких температур и активного солнечного потока через панорамную кровлю вынудила архитекторов использовать пленку, выпускаемую компанией Solar Gard, Saint-Gobain Performance Plastics (California, USA), на площади 30000 м. кв. По данным компании, решение

---

позволило значительно снизить внутреннюю температуру и сократить количество пропускаемых УФ лучей.

Иной тип решения был предусмотрен в процессе проектирования панорамной кровли терминала «А» аэропорта Внуково (Москва, Россия), где были спланированы струйные вентиляторы, произведенные компанией Systemair (Sweden), обеспечивающие достаточную циркуляцию воздуха и обдув кровли. Принцип работы заключается в том, что каждый вентилятор подхватывает поток воздуха предыдущего. Само покрытие состоит из 3500 м. кв. стекла, модули которого выполнены в виде треугольников.

В ряде проектов применяются также технологии выработки солнечной энергии [7]. В Мексике проектируется аэропорт с расположенными на крыше фотоэлектрическими панелями, генерирующими до 50 МВт, что позволит частично компенсировать затраты электроэнергии для обеспечения более чем 743000 м. кв. эксплуатируемой площади терминала. Примечателен аэропорт и тем, что расположен на нестабильном грунте, в связи с чем, проектируемая кровля будет максимально облегченной, а интервалы между пролетами составят более 100 м. Другим примером является аэропорт Viracopos International (Campinas, Sao Paulo State, Brazil), оснащенный 4100 фотоэлектрическими стеклопакетами, площадью 3340 м. кв. и заявленной мощностью 154 кВт/ч. Обеспечивается генерация достаточного количества энергии для питания более чем 10000 источников света и предотвращается выброс 120 тонн CO<sub>2</sub> в атмосферу ежегодно. Применяемое стекло типа «low-e photovoltaic glass», разработано компанией Onyx Solar (Ávila, Spain).

По типу конструкции покрытия панорамные кровли можно подразделить на плоскостные, пространственные и подвесные. Плоскостные кровли конструируют при помощи ферм и рам, пространственные выполняют в виде оболочек, при проектировании подвесных покрытиях применяют тросы и вантовые элементы [8]. Сегодня проектировщики

---

стремятся минимизировать видимые конструкции каркаса, о чем говорилось ранее, в связи с этим последние объекты аэропортостроения имеют кровлю по типу оболочки, поддерживаемую древовидными колоннами.

Одним из самых масштабных проектов является аэропорт Jewel Changi (Singapore), сочетающий в себе практически все последние тенденции развития отрасли [9]. Здание терминала представляет огромный кокон из стали и стекла, площадью 23410 м. кв. Изнутри, помимо основных объектов, будут находиться торговые точки, рестораны, гостиничные номера, сад из 1400 деревьев и водопад с высотой сброса воды 40 м. Над садом планируется устройство пешеходных дорожек на высоте 25 м., а так же подвесного моста, длина которого составит 50 м. С целью объединения столь многоцелевого пространства в единый комплекс архитекторы Safdiearchitects (Somerville, USA) разработали уникальный фасад, состоящий из 9000 стеклянных элементов (вес каждого составляет до 300 килограмм); 18000 стальных балок, спроектированных в CAD-программе, работающих совместно в более чем 6000 узлах. Конструкция крыши весит более 3000 тонн, однако архитекторы преднамеренно отказались от сложной системы передачи нагрузок. Всего сконструированы четырнадцать 12-метровых древовидных колонн, работающих совместно с кольцевой балкой, расположенной по периметру края кровли. Визуально купол воспринимается как консольная крыша, парящая на высоте 37 м. над землей.

Подбор вида стекла и расчет элементов занял более двух лет. Был проведен ряд испытаний, чтобы установить, что блики, отражаемые от поверхности фасада, не станут помехой для авиадиспетчеров и пилотов. Светопропускная способность материала типа «Low-E» подобрана в балансе между требуемым уровнем освещенности для растений и соображениями климат-контроля в помещении [10]. С целью достижения должного уровня звукоизоляции запроектирован 16-миллиметровый зазор, нивелирующий

---



шум от взлетной полосы. Разработана также уникальная технология установки стеклянных элементов. Каждый из них снабжен QR-кодом, содержащим информацию о точном местонахождении панели, который сканируется перед поднятием стекла. Максимальная высота подъема составила 45 м.

Как показал проведенный анализ новейших разработок в области проектирования панорамных покрытий, светопрозрачные кровли являются одним из наиболее популярных приемов в процессе проектирования аэропортов сегодня, вопреки высокой стоимости строительства и повышенным требованиям к постоянному высокотехнологичному сопровождению.

### Литература

1. Шумейко В. И., Евтушенко А.И., Кудлаева А.А. Перспективы развития стадиона как многофункционального спортивного объекта // Инженерный вестник Дона, 2017, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4111](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4111).
2. Евтушенко А.И., Нуриев В.Э., Зотов П.В. и др. Технология легких стальных тонкостенных конструкций и её особенности // Инженерный вестник Дона, 2018, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5398](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5398).
3. Watts A. Modern Construction. Switzerland: Birkhäuser, 2013. 318 s.
4. Weller B., Unnewehr S., Tasche S. Glass in Building: Principles, Applications, Examples. Berlin (Germany): 2012. 51 p.
5. Kohlmaier G., Sartory B. Houses of Glass: A Nineteenth-Century Building Type. Massachusetts ( United States of America): 1991. 102 p.
6. Schunck E., Oster H.J., Barthel R. Roof Construction Manual: Pitched Roofs. Berlin (Germany): Walter de Gruyter, 2013. pp. 104-105.
7. Goulding J. European Directory of Sustainable and Energy Efficient Building. Abingdon (United Kingdom):Routledge, 2014. pp. 145-146.

8. Kosic T., Krstic-Furundzic A.D. Architectural aspect of structural glass roof design. // Mid-term Conference "Structural Glass". Florida (United States of America): CRC Press, 2013. pp. 46-48.

9. Taneja N.K. Airline Industry: Poised for Disruptive Innovation? Abingdon (United Kingdom):Routledge, 2016. 200 p.

10. Chiras D.D. The Solar House: Passive Heating and Cooling. Vermont (United States of America): 2002. pp. 76-77.

### References

1. Shumeyko V. I., Yevtushenko A.I., Kudlayeva A.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4111](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4111).

2. Evtushenko A.I., Nuriev V.E., Zotov P.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2018, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5398](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5398).

3. Watts A. Modern Construction. Switzerland: Birkhäuser, 2013. 318 p.

4. Weller B., Unnewehr S., Tasche S. Glass in Building: Principles, Applications, Examples. Berlin (Germany): 2012. 51 p.

5. Kohlmaier G., Sartory B. Houses of Glass: A Nineteenth-Century Building Type. Massachusetts (United States of America): 1991. 102 p.

6. Schunck E., Oster H.J., Barthel R. Roof Construction Manual: Pitched Roofs. Berlin (Germany): Walter de Gruyter, 2013. pp. 104-105.

7. Goulding J. European Directory of Sustainable and Energy Efficient Building. Abingdon (United Kingdom):Routledge, 2014. pp. 145-146.

8. Kosic T., Krstic-Furundzic A.D. Mid-term Conference "Structural Glass". Florida (United States of America): CRC Press, 2013. pp. 46-48.

9. Taneja N.K. Airline Industry: Poised for Disruptive Innovation? Abingdon (United Kingdom): Routledge, 2016. 200 p.

10. Chiras D.D. The Solar House: Passive Heating and Cooling. Vermont (United States of America): 2002. Pp. 76-77.