

АРХИТЕКТУРНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ СВЕТОПРОЗРАЧНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ ФУТБОЛЬНЫХ СТАДИОНОВ

УДК 725.826:796.332:69.012.6

DOI: 10.24411/1998-4839-2019-00010

Г.В. Океанов

АО Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений «ЦНИИПромзданий», Москва, Россия

Аннотация

Рассмотрены различные аспекты архитектурного формирования светопрозрачных ограждающих конструкций, определяющих внешний облик и объемно-пространственную композицию футбольных стадионов. На основании опыта проектирования и строительства объектов чемпионата мира по футболу в России 2018 года выявлены типологические особенности большепролетных светопрозрачных покрытий, определены ритмометрические закономерности построения их структуры, установлены обоснованные геометрические параметры светопрозрачной оболочки покрытия. Предоставлен обзор и рекомендации по выбору современных светопропускающих строительных материалов и архитектурно-строительных систем, приведены основные характеристики, определяющие условия их применения в составе кровли.¹

Ключевые слова: большепролетное светопрозрачное покрытие, футбольный стадион, светопрозрачные ограждающие конструкции, остекление, светопрозрачное заполнение

ARCHITECTURAL DESIGN OF LARGE-SPAN TRANSLUCENT ENCLOSING STRUCTURES ROOFING FOOTBALL STADIUMS

G. Okeanov

JSC Central Research and Design and Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures «TsNIIPromzdany», Moscow, Russia

Abstract

Various aspects of the architectural formation of translucent covering structures that determine the appearance and volume-spatial composition of football stadiums are considered. Based on the experience of designing and constructing the stadiums for Football World Cup – 2018 in Russia, the typological features of long-span translucent coatings were identified, the structural rhythmometric patterns are determined, and reasonable geometric parameters of the translucent coating shell are established. An overview and recommendations for choosing the modern light-transmitting building materials and architectural systems is provided alongside the main characteristics that determine their roof application.²

Keywords: large-span translucent covering, football stadium, translucent enclosing structures, glazing, translucent materials

¹ **Для цитирования:** Океанов Г.В. Архитектурное формирование светопрозрачных ограждающих конструкций большепролетных перекрытий футбольных стадионов // Architecture and Modern Information Technologies. – 2019. – №4(49). – С. 120-138. – URL: https://marhi.ru/AMIT/2019/4kvart19/PDF/09_okeanov.pdf
DOI: 10.24411/1998-4839-2019-00010

² **For citation:** Okeanov G. Architectural Design of Large-Span Translucent Enclosing Structures Roofing Football Stadiums. Architecture and Modern Information Technologies, 2019, no. 4(49), pp. 120-138. Available at: https://marhi.ru/AMIT/2019/4kvart19/PDF/09_okeanov.pdf DOI: 10.24411/1998-4839-2019-00010

Широкомасштабное строительство футбольных стадионов в России связано с проведением чемпионата мира по футболу 2018 года и успешным развитием клубного спорта. Современный футбольный стадион – крупное многофункциональное спортивно-зрелищное сооружение, оказывающее стимулирующее влияние на формирование социальной среды и развитие городской инфраструктуры. Условия размещения, транспортной доступности, многотысячная вместимость, пригодность для проведения разнообразных массовых мероприятий, масштаб стадиона определяют его роль как крупного градообразующего центра, привлекают особое внимание к функциональному устройству и архитектурно-художественному облику.

Новейшие футбольные стадионы Российской Федерации отличаются выразительными архитектурными решениями и конструктивным новаторством, достигнутыми в результате применения современных материалов и технологий, методов проектирования и строительства [1]. В наибольшей мере современные высокотехнологичные строительные системы используются в составе большепролетных светопрозрачных покрытий, определяющих внешний облик и объемно-пространственную композицию футбольного стадиона. Большепролетное светопрозрачное покрытие является одним из основных архитектурных компонентов футбольного стадиона, наряду с игровым полем и чашей трибун.

Специалист в области архитектуры спортивных сооружений М. Виммер указывает, что яркие, оригинальные покрытия над трибунами создаются в результате сотрудничества архитекторов и инженеров-конструкторов и требуют изящных конструктивных решений. [2, с.83]. Коллективный процесс работы над проектом предполагает согласование противоречий функционального назначения, определенной архитектурной формы большепролетного светопрозрачного покрытия, физико-технических особенностей выбранных материалов и конструкций. Выбор рациональных решений обусловлен существующим опытом проектирования, строительства и эксплуатации с учетом заданных требований. Основными критериями архитектуры покрытия служат его объемно-пространственная структура и составная обобщенная форма, выраженная очертаниями кровли.

Требования строительных норм³ и международных спортивных правил⁴ определяют основные архитектурно-строительные решения покрытия, в частности, его устройство над всеми, без исключения, зрительскими местами для футбольных стадионов первой и высшей категорий по классификации Российского футбольного союза, вмещающих более 10 000 зрителей. Большепролетное светопрозрачное покрытие предназначено обеспечить защиту зрителей от воздействия агрессивных факторов внешней среды, а также комфортные условия пребывания на трибунах.

Функционально-планировочная композиция футбольного стадиона определена размещением трибун для зрителей вокруг игровой зоны с футбольным полем установленных размеров 105×68 м. Внешние очертания трибун ограничены условиями нормативной беспрепятственной видимости событий на поле в пределах от 180×150 до 310×280 м. Круглые в плане стадионы могут достигать диаметра 310 м. Уклон гребенки зрительских трибун, определяющий их высоту, ограничен 34°. Минимальная высота свободного пространства над полем составляет 21 м [3].

Внешние очертания трибун описываются прямоугольником, прямоугольником со скругленными или скошенными углами, многоугольником, овалом, кругом. Абрис покрытия, как правило, следует очертаниям трибун. Типологической особенностью футбольных стадионов является наличие сквозного проема над игровым полем, что позволяет классифицировать покрытие как светопрозрачное [4]. В большинстве случаев

³ СП 258.1325800.2016 «Стадионы футбольные. Правила проектирования»

⁴ Руководство по организации Чемпионатов мира ФИФА. Руководство по требованиям к стадионам. Версия для Чемпионата мира 2018 г.

горизонтальная проекция трибун полностью закрывается проекцией покрытия. Большепролетное светопрозрачное покрытие может выполняться из обособленных (над каждой трибуной), блокированных элементов или единым объемом.

Анализ архитектурных решений футбольных стадионов позволяет выделить прямоугольную, радиальную и произвольную объемно-пространственные структуры большепролетных светопрозрачных покрытий [5]. Тип структуры определяется взаимным расположением ее главных элементов, обладающих максимальным пролетом или выносом консоли, обеспечивающим формирование проема над полем.

Прямоугольная структура формируется элементами, ориентированными вдоль кромок поля; радиальная – расходящимися от центра поля к внешнему периметру трибун; произвольная – индивидуальным расположением, чаще тангенциальным, или комбинацией разных типов (рис. 1).

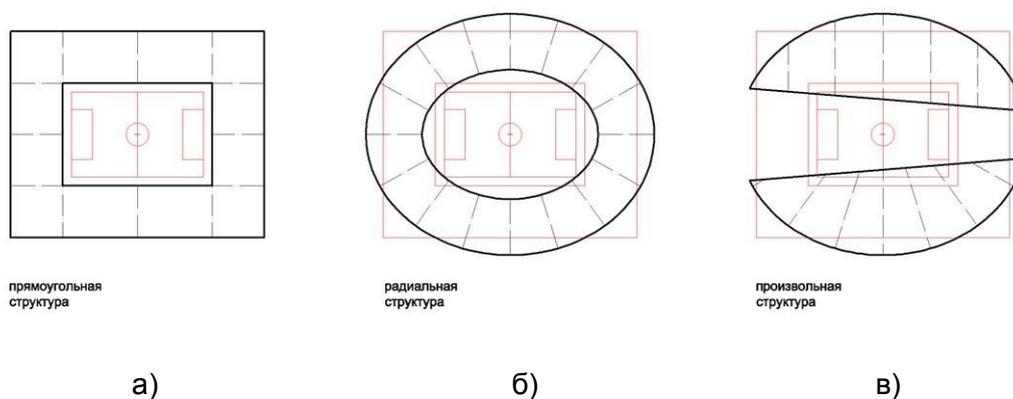


Рис. 1. Формализованные схемы объемно-пространственной структуры большепролетного светопрозрачного покрытия футбольных стадионов: а) прямоугольная; б) радиальная; в) произвольная (рис. автора)

Прямоугольная структура характерна для пространственных стержневых, консольных, порталных и вантовых конструктивных систем мостового типа, радиальная – для висячих, с растянутым и сжатым кольцами, консольных, мачтовых вантовых подвесов. Произвольная структура, в большинстве случаев, реализуется в системе порталных элементов или произвольной комбинации.

Регулярная планировочная композиция футбольного стадиона, обусловленная делением трибун на схожие по конфигурации сектора и ярусы, предопределяет соответствующую сетку опор и секционное формирование большепролетного светопрозрачного покрытия (рис. 2). Габариты секции ограничены элементами каркаса, ориентированными от поля на периферию, внешним и внутренним периметрами. Секция – типовой структурный повторяющийся элемент покрытия – представляет собой или составляется из объемно-пространственных модулей. Модульная структура обеспечивает геометрическую координацию и унификацию элементов, реализацию формообразующего потенциала применяемых архитектурно-строительных систем.

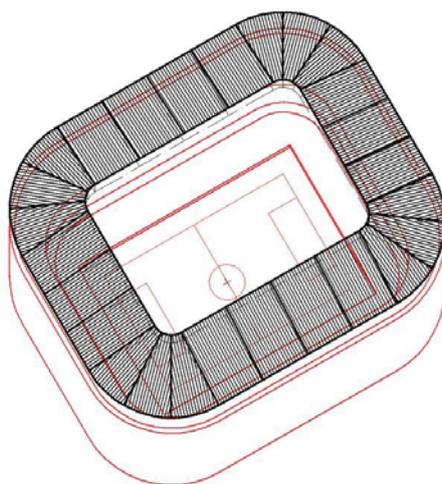


Рис. 2. Секционное формирование большепролетного светопрозрачного покрытия футбольного стадиона (рисунок автора)

Совокупность объемно-пространственных модулей образует составную обобщенную форму большепролетного светопрозрачного покрытия, которая определяется приспособлением поверхности простой геометрической формы в результате последовательных деформаций к заданной объемно-пространственной конфигурации футбольного стадиона.

Характеристикой простой геометрической формы является выпуклость (вогнутость), отклонение от горизонтальной плоскостности, при котором удаление точек поверхности сечения большепролетного светопрозрачного покрытия уменьшается (увеличивается) от внешнего периметра к центру. Выпуклость определяет функциональную организацию кровли, обеспечивая водосток, водоудаление и снегозадержание, оказывая влияние на параметры естественного освещения арены. Функциональными параметрами формы служат также длина скатов, направление и величина уклона поверхности кровли. Различаются выпуклая, вогнутая, выпукло-вогнутая, седловидная и комбинированная формы поверхности большепролетного светопрозрачного покрытия. Выпуклая форма определяет уклон в направлении от проема над полем ко внешнему периметру, вогнутая – в направлении поля. Выпукло-вогнутая поверхность обеспечивает уклон от внешней и внутренней кромок в середину. Седловидная кровля имеет уклоны и внутрь, и наружу, напоминая формой верховое седло. В архитектурной практике находят применение разнообразные комбинации структуры и формы покрытия.

Большепролетное светопрозрачное покрытие отличается относительно малой стрелой подъема, что обеспечивает минимальный строительный объем футбольного стадиона. Уменьшение высоты кровли над трибунами способствует лучшей защите зрительских мест от осадков и прямых солнечных лучей [3]. Снижение конструктивной высоты покрытия предполагает минимальные уклоны его скатов, что затрудняет функциональную организацию кровли.

Модульная структура покрытия усложняет рельеф кровли, представляя ее как систему плоских или объемных криволинейных поверхностей, пересекающихся между собой с образованием ребер и ендов для канализации и отведения дождевых и талых вод; обеспечивает аппроксимацию архитектурной формы, представляя ее как систему согласованных плоских, цилиндрических, конических или седловидных поверхностей, способствуя унификации конструктивных решений (рис. 3).

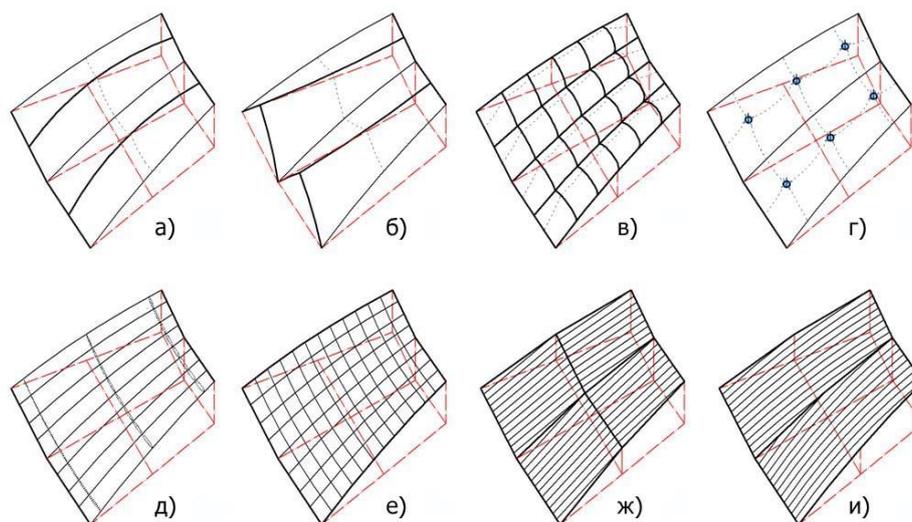


Рис. 3. Модульная структура секции большепролетного светопрозрачного покрытия футбольного стадиона: а) тентовая оболочка на жестком контуре с арочной опорой; б) тентовая оболочка на гибком контуре с оттяжкой за вершину; в) тентовая оболочка на жестком контуре с арочными опорами; г) тентовая оболочка с внутренними опорами на висячие мачты; д) пневмомат из пневмоподушек; е) светопрозрачная ограждающая конструкция с плоскими четырехугольными ячейками; ж) система плоских модулей на основе многослойных полимерных панелей с алюминиевым переплетом; и) система модулей с цилиндрической поверхностью на основе модульных полимерных панелей (рисунок автора)

Большепролетное светопрозрачное покрытие футбольного стадиона представляет собой многослойную систему сетчатых структур каркаса, обрешетки и ограждающих конструкций кровли, светопрозрачных и непрозрачных. Сетчатые структуры строятся в соответствии определенными архитектурной концепцией ритмометрическими закономерностями и требуют взаимного согласования. Каркас образует основу объемно-пространственной структуры покрытия. Обрешетка, выполненная из жестких стержневых или гибких растянутых элементов, адаптирует геометрию каркаса к заданной архитектурной форме, служит основанием кровли. Кровля образует архитектурную форму покрытия.

Кровля большепролетного светопрозрачного покрытия футбольного стадиона представляет собой сетчатую оболочку, узлы которой лежат непосредственно на заданной поверхности. Структурные закономерности сетки светопрозрачных ограждающих конструкций, основанные на ритмометрическом повторении однотипных ячеек, характерном для орнаментальных построений, оказывают принципиальное влияние на архитектурное формообразование покрытия, обеспечивая целостность и органичность композиции [6]. При моделировании архитектурную форму большепролетного светопрозрачного покрытия выражает сетка характерных линий: образующих, движением которых создается поверхность, выявленных в сечениях; направляющих, вдоль которых осуществляется движение, как правило – его внешний и внутренний периметры. Различают поступательное и вращательное движение образующей, и их комбинации. Согласование и построение сложных поверхностей осуществляется деформацией образующей в результате растяжения, масштабирования, эквидистантной проекции [8]. В качестве образующей может быть выбрана любая, не обязательно прямая линия. Граненые поверхности, отражающие структуру обрешетки и заданный формат ячеек, получаются векторным переносом дискретизированной в ломаную линию образующей.

Построение сетки плоских ячеек заданного формата основано на свойстве двух параллельных векторов задавать четырехугольную плоскость, при этом длины направляющих параллельных векторов могут различаться в заданных пределах. Направление векторов может последовательно изменяться. При построении аппроксимированных граненых поверхностей, вращение представляется как процесс последовательных векторных перемещений, направленных по касательной. Вращением прямой, параллельной оси, задается цилиндрическая, пересекающей ее – коническая поверхности. Совмещение растяжения и вращения, или комбинация нескольких аппроксимированных поверхностей позволяет получить сложные пространственные формы простого начертания, в том числе волнообразные и бугристые. Любые пространственные формы могут быть образованы сетью с плоскими четырехугольными ячейками заданного габарита, если допустить локальные изменения ритмической структуры и редукцию некоторых проемов в треугольники.

Находят применение сетки с четырехугольными, треугольными и многоугольными ячейками. В большинстве случаев используются сетки с четырехугольными ячейками элементов. Треугольные и многоугольные сетки требуют усложнения узла при соединении более четырех стержней и снижают эффективность края материалов заполнения, имеющих, как правило, прямоугольный формат, что существенно ухудшает экономические показатели.

Сетки сложной геометрической формы не используют заранее определенных математических или геометрических алгоритмов и моделируются следуя пространственной логике построений в виде аппроксимированной сети. Упрощенная пространственная модель покрытия, отражающая требуемую топологию сетки, последовательно уточняется до тех пор, пока пропорции и размеры ячеек не придут в соответствие с заданием. Еще одним способом построения сложной формы является блокирование обособленных поверхностей, совместимых по контуру.

Архитектурное формообразование большепролетного светопрозрачного покрытия футбольного стадиона должно учитывать физические свойства и технологические особенности светопрозрачных ограждающих конструкций. Основные ограничения определяются минимальными значениями уклонов и радиусов изгиба, устойчивостью к нагрузкам и воздействиям, недопустимостью крепления инженерного оборудования к переплетам и светопрозрачному заполнению⁵.

Светопрозрачная ограждающая конструкция большепролетного покрытия состоит из переплета и светопрозрачного заполнения его проемов. Переплет, или монтажная профильная система, в свою очередь, представляет собой плоскую или пространственную сетчатую структуру из профилированных стержневых или растянутых гибких элементов, образующую ячейки, предназначенные для установки светопрозрачного заполнения. Светопрозрачное заполнение – плоский или объемный элемент, закреплённый в проёме ячеек переплета покрытия.

Сетчатая структура светопрозрачной ограждающей конструкции большепролетного покрытия футбольного стадиона характеризуется формой, размерами, плоскостностью ячеек; однородностью структуры; однотипностью линейных и узловых элементов. Сетка определяется в топологии как однородная ячеистая система. Под однородностью в данном случае следует понимать идентичность состава и структуры большепролетного светопрозрачного покрытия по всей поверхности. Неоднородность воспринимаются как нарушение определенной ритмометрической закономерности, выраженной сгущением линейных элементов и искажением формы.

⁵ СП 363.1325800.2017 «Покрытия светопрозрачные и фонари зданий и сооружений. Правила проектирования».

Стержни переплета сетки с четырехугольными ячейками целесообразно ориентировать по линиям наибольшего ската и горизонталям для структур прямоугольного типа; меридианам и горизонталям для радиальных структур; по направлениям условной сетки ортогональных линий, разбитой на плане и спроецированной на поверхность покрытия для произвольных структур.

В качестве светопрозрачного заполнения ячеек переплета большепролетного светопрозрачного покрытия футбольного стадиона применяются следующие строительные изделия и системы: стекло многослойное, полимерные панели, тентовые оболочки, пневматические панели (табл. 1). Следует отметить, что выбор светопрозрачного материала в значительной мере влияет на стоимость большепролетного светопрозрачного покрытия, а его неудачный выбор может привести к утрате определенных архитектурных качеств [7].

Таблица 1. Формообразующие параметры материалов светопрозрачного заполнения ограждающих конструкций большепролетного покрытия футбольных стадионов.

Тип светопрозрачного заполнения	Материал светопрозрачного заполнения	Стандартный формат материала, м	Структура переплета	Формат ячеек переплета	Архитектурная форма поверхности	Min уклон
Изделия из силикатного стекла	Стекло многослойное	Лист 3,21×2,25	Пространственная система плоских ячеек	Прямоугольные 1,5×1,5м; Треугольные 1,8×2,1 м; многоугольные	Плоская или пространственная, граненая	5°
Полимерные панели	монолитные	Лист 3,05×2,05	Пространственная система плоских, цилиндрических или конических ячеек	Прямоугольные, треугольные и многоугольные 2,0×3,0м	Плоская или пространственная, ячеистая, с гладкой или рельефной фактурой	15°
	Многослойные	Панель 2,10×6,00 1,00×9,00	Пространственная система плоских или цилиндрических ячеек, с прогонами	Прямоугольные, трапециевидные, 1,0×2,0м	Плоская или цилиндрическая граненая поверхность	5°
	модульные	Панель 0,60×12,00 0,90×24,00	Система прогонов	Прямоугольные, трапециевидные, шаг прогонов ≤3,0м	Плоская или цилиндрическая сглаженная	5°
	Профилированные	Панель 1,00×7,00	Система прогонов	Прямоугольные, трапециевидные, шаг прогонов ≤2,0м	Плоская или цилиндрическая сглаженная	7°
Тентовые оболочки	Технические ткани с полимерным покрытием, полимерные пленки	Рулон 3,0	Гибкая и жесткая пространственная сетка, обеспечивающая устойчивую форму оболочки	Пространственная, или плоская, с внутриконтурными опорами и оттяжками	Поверхность отрицательной гауссовой кривизны	Исключается скопление воды на поверхности
Пневматические панели	Полимерные пленки, технические ткани с полимерным покрытием	Рулон 1,25-3,0	Пространственная стержневая сетка	Прямоугольные 2,0×20,0 4,0×50,0 Круглые, многоугольные	Пространственная ячеистая, с двояковыпуклой фактурой	-

Светопрозрачное ограждение на основе многослойного стекла представляют собой пространственную сетчатую оболочку с плоскими ячейками. Форма и формат ячеек определяются геометрическими размерами листового стекла заводского производства $3,21 \times 2,25$ м, используемого при изготовлении многослойного ламинированного высокопрочного стекла, не допускающего образования осколков при разрушении (рис. 4). Многослойное стекло чувствительно к деформациям и требует обеспечения плоскостности и жесткости переплетов. Анализ структуры остекленных большепролетных покрытий показывает преимущественное распространение прямоугольных сеток с размером ячеек $1,5 \times 1,5$ м, реже треугольных, в пределах $1,8 \times 2,1$ м [8]. Применение остекления ячеек с площадью более $2,5 \text{ м}^2$ требует технического и экономического обоснования⁶. Сочетание в сети плоских четырехугольных и треугольных ячеек позволяет обеспечить необходимую пространственную форму и однородность структуры большепролетного светопрозрачного покрытия на этапах построения модели, особенно при отсутствии мощных систем автоматического проектирования.



Рис. 4. Многослойное силикатное стекло в составе большепролетного светопрозрачного покрытия

При построении пространственной модели остекленного покрытия с четырехугольной ячейкой стержни переплета должны задавать систему плоскостей, что достигается параллельностью двух противоположных сторон каждой ячейки. Остекление БСП может быть образовано как поверхность переноса, когда одна линия, образующая, скользит вдоль другой, направляющей, с последующим делением полученной поверхности на плоские ячейки [7]. На практике чаще всего формирование плоских ячеек остекления обеспечивается использованием параллельных горизонтальных прогонов. Если допустить определенные отклонения от заданной поверхности, можно получить эстетически привлекательные однородные сетки с плоскими ромбовидными ячейками, обладающие эффектом «рыбьей чешуи».

Оригинальный архитектурный облик футбольного стадиона и качество естественного освещения арены обеспечивается применением солнцезащитных, антибликовых, тонированных, окрашенных в массу и зеркальных стекол в составе светопрозрачного ограждения большепролетного покрытия. Особые возможности предоставляют функция управления прозрачностью и светопропусканием стекла. При поступлении

⁶ СП 363.1325800.2017 «Покрытия светопрозрачные и фонари зданий и сооружений. Правила проектирования».

соответствующего сигнала, изначально бесцветное прозрачное стекло может становиться матовым или сильно затемненным, синего оттенка.

Безусловным преимуществом остекленных конструкций является применение в структуре покрытия прямолинейных стержневых элементов. К тому же, силикатное стекло – единственный негорючий из материалов светопрозрачного заполнения. Большой вес остекленной кровли, сложность и высокая стоимость ограничивают ее применение в составе БСП современных футбольных стадионов. Характерными образцами применения покрытий с силикатным стеклом служат стадионы Стад де Франс в Париже и Спартак в Москве. Доводом в пользу остекления послужили долговечность и негорючесть материалов.

В составе светопрозрачных ограждающих конструкций большепролетных покрытий футбольных стадионов применяются монолитные, многослойные, модульные, профилированные полимерные панели и объемно-пространственные оболочки⁷. Как правило, используются панели из поликарбоната (ПК) и акрилового стекла (ПММА). Панели обладают высокой гибкостью и способны образовывать криволинейные поверхности по форме, заданной переплетом, без предварительного нагрева в пределах допустимых радиусов. Допустимый радиус изгиба панели зависит от ее толщины. Даже незначительная выпуклость поверхности заполнения, полученная при изгибе, позволяет избежать последствий остаточных деформаций в виде скопления воды и грязи при минимальных уклонах кровли. Отличительной особенностью полимерных панелей является значительное тепловое линейное расширение, что необходимо учитывать в конструкциях переплета и при выборе формата ячеек сетки.

Монолитные светопрозрачные панели выпускаются в стандартных размерах 2,05×3,05 м и используются в ограждающих конструкциях БСП аналогично многослойному силикатному стеклу (рис. 5). Они требуют периметрического опирания. Допускают отклонения геометрии переплета от плоскости и изгиб по форме основания в пределах упругих деформаций. В покрытиях стадионов находят применение панели толщиной 8-20 мм. Производители монолитных панелей указывают минимально допустимый уклон поверхности светопрозрачного ограждения с монолитными панелями в пределах 7-15°⁸.

Изгиб монолитных панелей, приводящий к образованию выпуклых или седловидных поверхностей, позволяет уменьшить их тенденцию к образованию остаточных деформаций и использовать заполнение меньшей толщины. Распространенным решением является устройство кровли большепролетного покрытия в виде системы цилиндрических и конических сводов с радиусом кривизны в пределах 3 м, расположенных вдоль ската и соединенных между собой дренажными лотками. Футбольный стадион Д. Меацца в Милане наглядно демонстрирует приведенное решение. Технологическая сложность, высокие требования к конструкции переплета, аналогичные остеклению, и цена ограничивают применение монолитных полимерных панелей в светопрозрачных ограждениях большепролетных покрытий футбольных стадионов.

Полимерные светопрозрачные панели в результате высокотемпературного формования позволяют получить объемно-пространственные оболочки в виде куполов или пирамид. Они применяются в качестве заполнения проемов светопрозрачного ограждения большепролетного покрытия. Размещение оболочек на жестком, приподнятом над поверхностью кровли основании позволяет классифицировать их как зенитные фонари. Размер объемно-пространственных оболочек ограничен габаритом стандартной монолитной панели.

⁷ Данные по полимерным панелям из состава НИОКР ЦНИИПромзданий по теме «Определение нормируемых параметров и разработка методики расчета конструкций из поликарбоната» 2016 г.

⁸ СП 386.1325800.2018 «Конструкции светопрозрачные из поликарбоната. Правила проектирования».



Рис. 5. Монолитные полимерные панели в составе большепролетного светопрозрачного покрытия (фото автора)

Многослойные панели представляют собой изделие из двух и более параллельных слоев пластика, соединенных между собой вертикальными и наклонными ребрами, образующими каналы (рис. 6). При устройстве большепролетных покрытий применяются панели с толщиной от 10 до 40 мм, стандартной шириной 2100 мм. Для масштабных проектов могут выпускаться нестандартные изделия с измененной структурой, шириной, увеличенной массой и толщиной слоев в соответствии с техническим заданием.



Рис. 6. Многослойные полимерные панели в составе большепролетного светопрозрачного покрытия (фото автора)

Каналы многослойных панелей следует ориентировать по линии наибольшего ската кровли для удаления конденсатной влаги из внутренних полостей. Изгиб панелей по

форме, заданной конструкцией переплета, осуществляется только в направлении каналов. Устройство криволинейных поверхностей из многослойных панелей требует изгиба скатных элементов переплета по форме профиля, что, в свою очередь, обеспечивается геометрией обрешетки и несущего каркаса. Применение изогнутых профилей переплета и обрешетки значительно удорожает покрытие. Для удешевления, криволинейные поверхности заменяют составными гранеными из плоских фрагментов, расположенных под углом друг к другу.

Ячейки трапециевидной формы, необходимые при формировании трёхмерных поверхностей большепролетного светопрозрачного покрытия, устраиваются с наклоном боковых сторон к основанию в пределах 75° чтобы обеспечить необходимую жесткость кромки при косом срезе ребер панели. Большая длина полимерных панелей в структуре покрытия приводит к значительным перемещениям кромки в результате теплового расширения. Высокое температурное линейное расширение позволяет применять многослойные панели длиной до 9,0 м, в редких случаях 13,5 м. При длине скатов кровли БСП футбольного стадиона более 15 м необходимо применять соединение внахлест.

Формат ячейки ограждения с многослойными панелями зависит от их толщины, принимается на основании расчета заполнения по прочности, устойчивости и деформативности. Дополнительным критерием служит величина остаточных деформаций, возникающих в результате долговременных воздействий. Для предварительных расчетов следует принимать четырехугольную ячейку с размерами 1,0×2,0 м, ориентированную по скату или горизонту. Минимальный уклон кровли с многослойными светопрозрачными панелями составляет 5° . Многослойные полимерные панели успешно применены в светопрозрачных ограждающих конструкциях большепролетных покрытий футбольных стадионов Лужники в Москве (рис. 6) и Самаре.

Модульные полимерные панели применяются в составе строительных систем светопрозрачного ограждения, включающих соединительные профили и детали переплета. Внутренняя структура модульных и многослойных панелей аналогична. Каждая модульная панель шириной 600 или 900 мм имеет по двум продольным сторонам зубчатые бортики, обеспечивающей герметичное соединение между собой посредством защелкивающейся рейки, выполненной из пластика или алюминия, входящей в состав системы. Рейки образуют на поверхности ограждения своеобразную фактуру параллельных ребер. Подвижное крепление к обрешетке достигается закладными металлическими деталями, устанавливаемыми в стыки панелей (рис. 7). Пространственную форму светопрозрачного ограждения из модульных панелей определяют горизонтальные прогоны обрешетки.

Интеграция алюминиевых профилей усиления в продольный стык модульных панелей позволяет увеличить шаг прогонов обрешетки до 3 м. Профили усиления достаточного сечения совместно с рейками-защелками, составляющие переплет системы модульных панелей, обеспечивают надежное крепление их продольных кромок без использования горизонтальных элементов обрешетки. Система обеспечивает герметичность кровли и водоудаление при уклонах от $1,5^\circ$. Предварительный изгиб профилей усиления, в том числе с переменным радиусом кривизны, позволяет формировать более сложные пространственные поверхности ограждения. Геометрия модульных панелей с параллельными продольными сторонами определяет их успешное применение для устройства протяженной кровли на основе комбинаций плоскостей, цилиндрических, конических и седловидных поверхностей.

Шарнирное крепление двух противоположных торцов панелей к жесткой раме, со стыками вдоль пролета, формирует объемно-пространственный модуль, по форме близкий к цилиндрическому своду с пролетами до 4,5 м. Система модулей позволяет получить протяженную светопрозрачную поверхность с выраженным рельефом. Определённые сложности вызывает устройство ребер и ендов по линиям излома формы, так как необходимо совместить метрические структуры ребристых поверхностей, отсеченных под

разными углами. Ребра препятствуют стоку воды в ендовах и требуют устройства лотков. Модульные поликарбонатные панели применены при возведении большепролетного светопрозрачного покрытия футбольных стадионов в Казани и Саранске.



Рис. 7. Модульные полимерные панели в составе большепролетного светопрозрачного покрытия (фото автора)

Профилированные полимерные панели при экструдировании получают периодическую волнообразную или трапециевидную форму и за счет развитого сечения приобретают необходимую несущую способность. Толщина полимерного слоя в конструктивных панелях составляет 1–6 мм, общая высота профиля достигает 115 мм.

Установка профилированных панелей производится непосредственно на обрешетку, без применения монтажной системы. При уклонах кровли покрытия более 12° профилированные панели соединяются по длине внахлест. Соединение в латеральном направлении также производится внахлест с перекрытием от 0,5 до 1,5 гофры или волны. Наличие подвижных точечных креплений позволяет применять максимально длинные панели, до 13,5 м, обеспечивая соответствующее перекрытие по длине. Ширина конструктивных панелей от 660 до 1420 мм. Геометрия некоторых полимерных панелей и профилированного стального настила совпадают, что позволяет создавать комбинированные, однородные по фактуре кровли. Профилированные полимерные панели образуют протяженные однородные плоские и цилиндрические поверхности, но создают трудности при изменении радиусов и на переломах формы. Формирование ребер и ендов решается посредством металлических лотков и нащельников, не обеспечивающих достаточной надежности кровли покрытия. Профилированные поликарбонатные панели использовались в составе большепролетного покрытия футбольного стадиона Авива в Дублине (рис. 8).

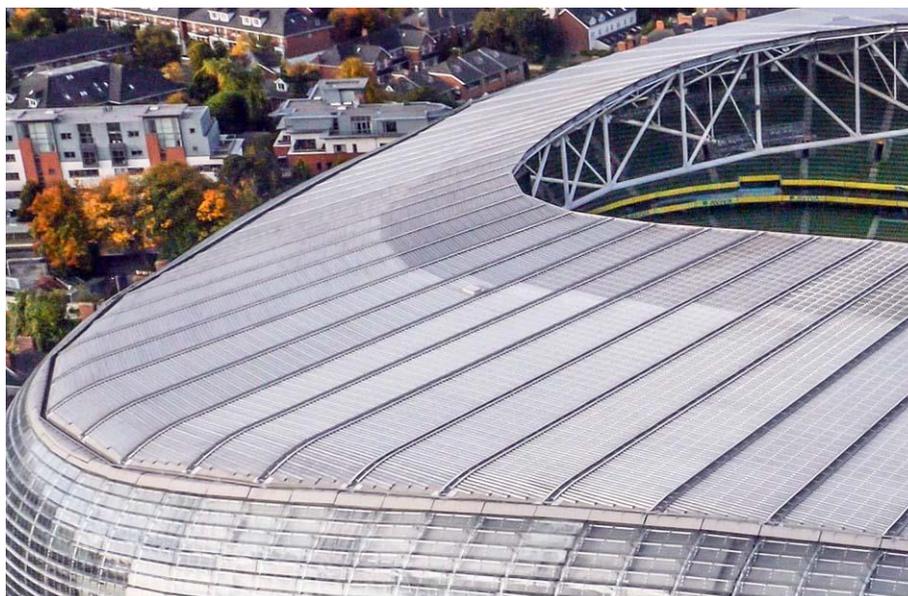


Рис. 8. Профилированные полимерные панели в составе большепролетного светопрозрачного покрытия.

Приведенные данные использованы автором в СП 386.1325800.2018 «Конструкции светопрозрачные из поликарбоната. Правила проектирования»

Тентовые оболочки⁹ представляют собой поверхности отрицательной гауссовой кривизны, выполненные из мягких и гибких материалов, работающих исключительно на растяжение, закрепленные и натянутые на каркасе из жестких опор и гибких тросовых элементов. Функцию обрешетки здесь выполняет поддерживающая структура¹⁰. Плоский замкнутый контур не обеспечивает стабильной формы мембраны, которая образуется в результате ее дополнительного крепления или искривления контура. Растянутый за три точки крепления фрагмент мембраны образует чувствительную к внешним воздействиям плоскую поверхность. Четвертая точка крепления, находящаяся вне этой плоскости, приведет к формированию простейшей базовой формы отрицательной гауссовой кривизны - седловидной поверхности.

Отдельные седловидные поверхности объединяются в объемно-пространственные модули, соответствующие по габаритам размерам ячейкам каркаса большепролетного покрытия (рис. 9). Модули строятся как составная форма, образуемая жесткими или гибкими растянутыми элементами обрешетки с мягким тентовым заполнением пространства между ними. Модули мягких тентовых оболочек формируются на каркасе с гибким или жестким пространственным контуром, с внутриконтурными опорами или оттяжками. Величины отдельных поверхностей мягкой тентовой оболочки ограничены прочностью материала мембраны на разрыв, и составляют, оценочно, до 400 м² [9].

⁹ Данные по тентовым оболочкам предоставлены из состава НИОКР ЦНИИПромзданий «Предложения по совершенствованию конструктивных решений зданий и сооружений с применением архитектурно-строительного текстиля» 2016г.

¹⁰ СП 384.1325800.2018 «Конструкции строительные тентовые. Правила проектирования».

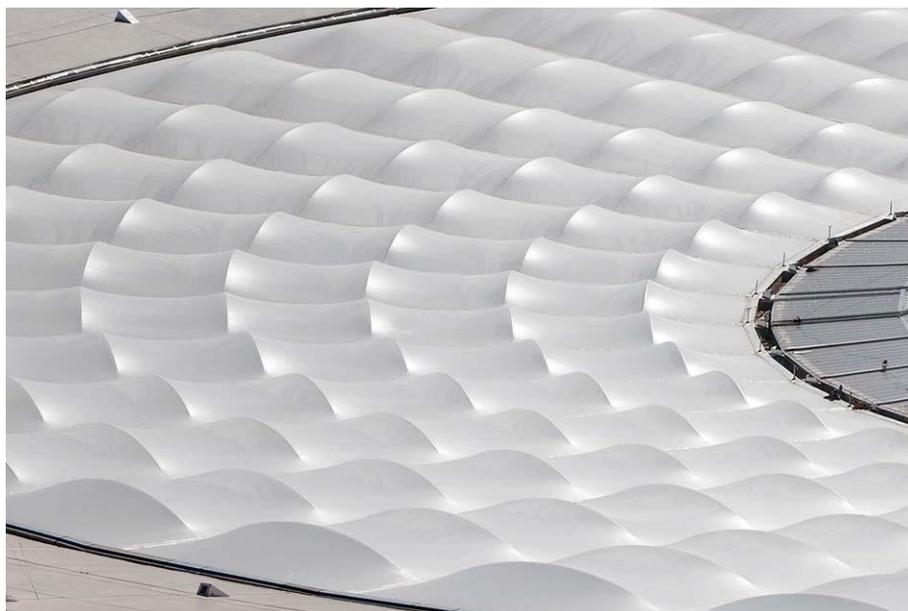


Рис. 9. Мягкая тентовая оболочка в составе большепролетного светопрозрачного покрытия

Блокированные модули создают волнистую, ребристую, бугорчатую или иную сложную поверхность покрытия. Широкое распространение получили сводчатые модули с каркасом из арок, складки на жестком основании и пирамидальные оболочки с оттяжкой за верхний угол. Применение висячих опор или подвесов позволяет создать систему шатровых и воронкообразных, близких к коническим, форм для придания тентовой оболочке дополнительного рельефа и оптимизации условий ее статической работы. В качестве мембраны применяются полиэфирные ткани с ПВХ-покрытием, обладающие светопропусканием до 20%; стеклоткани с ПТФЭ со светопропусканием до 35% или ЭТФЭ пленки, пропускающей более 90% света. Мембрана может быть окрашена в массу или содержать полноцветные печатные изображения на поверхности. Особые выразительные возможности предоставляет архитектору комбинация в составе покрытия прозрачных и полупрозрачных поверхностей. Свойство мембраны восстанавливать первоначальный размер и форму после деформации, в сочетании с малым весом, определяют ее применение в трансформируемых и сборно-разборных структурах. Мягкие тентовые оболочки применены в составе БСП футбольных стадионов в Волгограде и Ростове-на-Дону.

Приведенные данные использованы автором в СП 384.1325800.2018 «Конструкции строительные тентовые. Правила проектирования».

Пневматические панели представляют собой особый случай натяжных конструкций, двояковыпуклую структуру из мягкой двухслойной или многослойной, наполненной сжатым воздухом, мембраны с жестким пространственным контуром. В качестве несущего основания БСП футбольных стадионов с кровлей из пневматических панелей наибольшее распространение получили легкие разреженные структуры, такие как тросовые сети или пространственные структуры с ячейками большого размера.

Соотношение внешних воздействий и давления воздуха внутри пневматической панели определяют ее двояковыпуклую форму. Плавность очертаний и выпуклость поверхностей отражают тектоническую сущность сжатого воздуха, сдерживаемого напряженной оболочкой [10]. При падении внутреннего давления возникает прогиб поверхностей, чреватый образованием водяных линз. Различают пневматические линзы на круглом, овальном и многоугольном основании и четырехугольные пневматические подушки. Их пространственную форму лучше всего передает мыльная пена. Несущая способность

пневмопанели зависят от прочности оболочки на разрыв. Форма периметра пневматических панелей должна быть согласована с геометрией каркаса большепролетного покрытия. Оптимальным формат ячейки для пневматической панели рекомендуется установить в пределах от 2 до 4 м по ширине, и до 50 м по длине. Для обеспечения стабильности формы применяются биоморфный подход и поддерживающие структуры в виде тросовых сеток, по функции аналогичные обрешетке [11].

Способность пневмопанелей из прозрачной ЭТФЭ пленки пропускать до 95% света в видимом диапазоне и ультрафиолетовые лучи наилучшим образом способствует вегетации натуральной травы газона футбольного поля. Пленки могут быть цветными или содержать печатное изображение на поверхности. При нанесении печати на два слоя пленки можно добиться эффекта, напоминающего солнечные рефлекссы на воде за счет изменения давления внутри панели. Пневматические панели из полимерной пленки применены в светопрозрачных ограждающих конструкциях большепролетного покрытия стадионов «Фишт» в Сочи (рис. 10) и «Зенит» в Санкт-Петербурге.

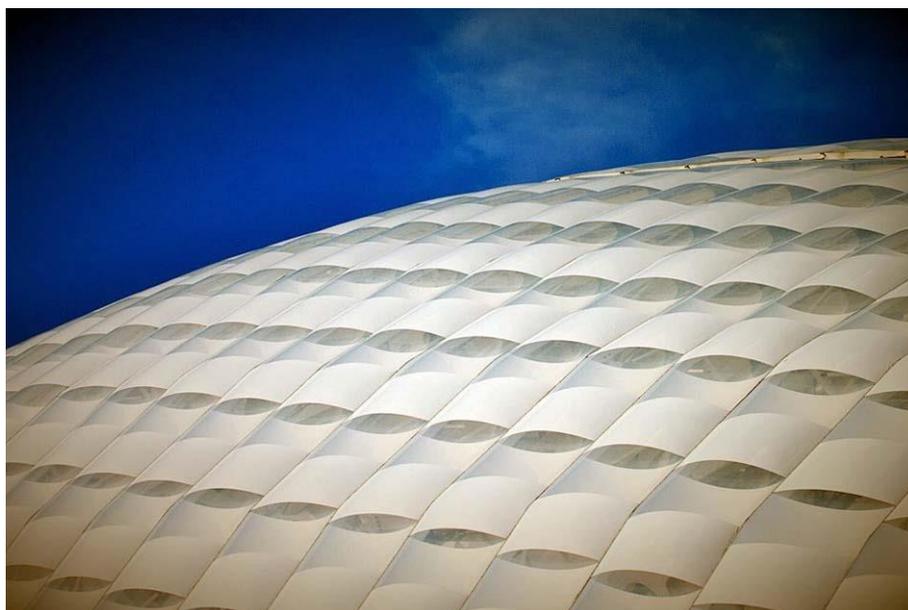


Рис. 10. Пневматические панели из полимерной пленки в составе большепролетного светопрозрачного покрытия

Комбинация светопрозрачных ограждающих конструкций друг с другом или в сочетании с непрозрачными конструкциями в составе большепролетного светопрозрачного покрытия предоставляет широкие возможности по оптимизации естественного освещения арены футбольного стадиона (рис. 11). Система локальных проемов, устроенных по типу фонарей кровли, может служить оригинальным композиционным приемом формирования архитектурно-художественного облика стадиона.

Требования по обеспечению пожарной безопасности, предъявляемые к материалам и конструкциям, сформулированы в ФЗ №123¹¹, СП 2.13130¹², СП 4.13130¹³. Требования к покрытию формируются на стадии разработки Технического задания, Специальных технических условий. Большепролетное светопрозрачное покрытие футбольного стадиона в данном контексте необходимо трактовать как навес над трибунами.

¹¹ Федеральный закон от 22 июля 2008 г. N 123-ФЗ Технический регламент о требованиях пожарной безопасности.

¹² СП 2.13130.2012 Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты.

¹³ СП 4.13130.2013 Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям.

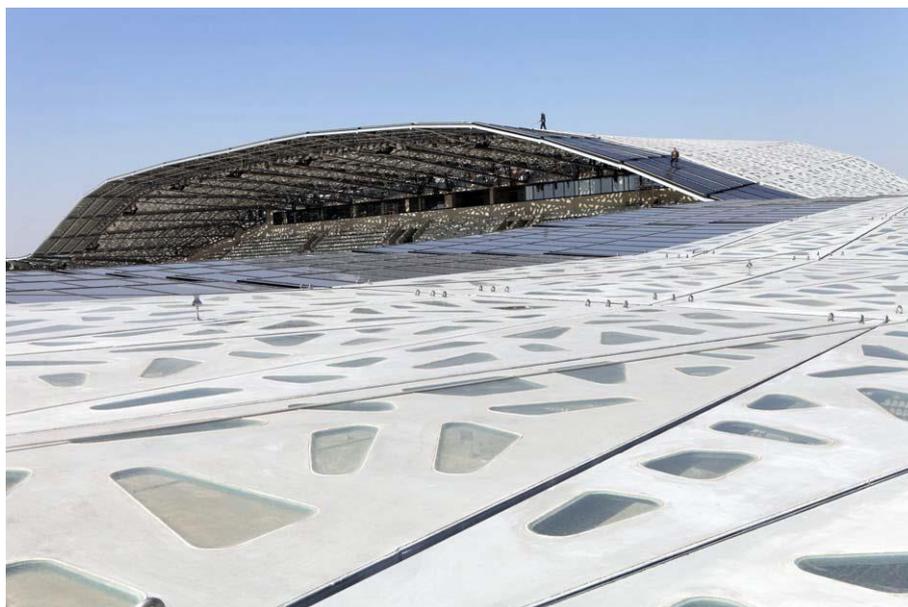


Рис. 11. Комбинированное большепролетное светопрозрачное покрытие

Благодаря наличию проема над полем, покрытие не препятствует воздухообмену и не приводит к скоплению горячих продуктов горения в подкровельном пространстве, способствующих возгоранию самого покрытия. Конструкция трибун не предполагает пожара большой мощности во внутреннем пространстве арены, приводящего к возгоранию и распространению пламени по кровле. Наибольшую угрозу для большепролетного светопрозрачного покрытия представляют кабельные проводки, которые следует устраивать в огнестойких каналах, и осветительное оборудование, необходимое в пожаробезопасном исполнении. Для оценки объективных требований к большепролетному светопрозрачному покрытию, в первую очередь – материалам светопрозрачного заполнения, целесообразно проведение расчета пожарных рисков и компьютерное моделирование пожара. Международный опыт демонстрирует успешное применение полимерных материалов в конструкциях БСП футбольных стадионов.

Архитектурное формирование большепролетного светопрозрачного покрытия футбольного стадиона может осуществляться в двух направлениях: углубленная разработка обобщенной интегральной формы покрытия простых очертаний или выявление тектонических закономерностей структуры ячеек, функционально объединённых в объемные модули.

Модульная структура усложняет пространственную форму большепролетного светопрозрачного покрытия, но упрощает конструирование. Применение объемно-пространственных модулей обосновано применением унифицированных элементов и узлов каркаса и ограждения. Модульная организация позволяет оптимизировать схему водоудаления с кровли, обеспечив локальное увеличение крутизны скатов, сформировав водосборные желоба в зоне стыка.

Многочисленное повторение унифицированных ячеек определяет орнаментальный характер структуры покрытия. Логика орнамента отражает топологические особенности построений, обеспечивая однородность структуры, основанную на ритмометрических закономерностях и конструктивных возможностях архитектурного формообразования светопрозрачных ограждающих конструкций большепролетных покрытий футбольных стадионов.

Использование установленных особенностей формообразования светопрозрачных ограждающих конструкций в практике проектирования позволяет реализовать принцип

целесообразности архитектуры большепролетного светопрозрачного покрытия футбольного стадиона.

Источники иллюстраций

Рис. 4. – URL: <https://www.earley.com/node/1781> (дата обращения: 02.06.19)

Рис. 5, 6, 7 – фото автора

Рис. 8. – URL: https://www.aerialphotographyireland.ie/gallery-aerial-photography-ire?lightbox=image_ou8 (дата обращения: 20.05.19)

Рис. 9. – URL: <https://i.archi.ru/i/650/200765.jpg?r=0.61754583445> (дата обращения: 20.05.19)

Рис. 10. – URL: https://kukarta.ru/wp-content/uploads/2014/09/MG_9936.jpg (дата обращения: 20.05.19)

Рис. 11. – URL: <https://www.consolis.com/references/jean-bouin-stadium/> (дата обращения: 02.06.19)

Литература

1. Ведяков И.И. Коллективный процесс // Спортивные мегапроекты. ЧМ-2018. Каталог проектов. – Екатеринбург: Устойчивое развитие, 2015. – 96 с.
2. Виммер М. Практическое пособие. Проектирование стадионов / пер. с англ. – Берлин, Dom Publishers, 2016. – 320 с.
3. Еремеев П.Г. Современные конструкции покрытий над трибунами стадионов. – Москва: АСВ, 2015. – 236 с.
4. Океанов Г.В. Адаптация архитектурных решений большепролетных светопрозрачных покрытий футбольных стадионов России к работе в режиме «наследие» // Промышленное и гражданское строительство. – 2019. – №5. – С. 4-13. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.05.04-13.
5. Лейкина Д.К. Архитектура большепролетных светопрозрачных покрытий футбольных стадионов / Д.К. Лейкина, Г.В. Океанов // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – №6. – С. 9-16.
6. Иконников А.В. Функция, форма, образ в архитектуре. – Москва: Стройиздат, 1986. – 288 с.
7. Буш Д.В. Уроки проектирования стадионов Чемпионата мира по футболу 2018 года // ACADEMIA. Архитектура и Строительство. – 2018. – №2. – С. 5-10. – URL: <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2018-2-5-10> DOI 10.22337/2077-9038-2018-2-5-10
8. Schober H. Transparent Shells, Form Topology Structure [Светопрозрачные оболочки. Форма топология структура]. – Berlin, Wilhelm Ernst&Sohn Publ, 2015. – 272 с.
9. Ермолов В.В. Прошлое, настоящее и будущее пневматических строительных конструкций // Пневматические строительные конструкции. – Москва, Стройиздат, 1983. – С 5-46.
10. Орса Ю.Н. Особенности архитектуры пневматических воздухоопорных сооружений // Пневматические строительные конструкции. Под ред. Ермолова В.В. – Москва, Стройиздат, 1983. – С. 170-187.

11. Пшеничникова К.А. Особенности формирования пневматической архитектуры в XXI веке // Architecture and Modern Information Technologies. – 2019. – №2(47). – С. 150-170. – URL: https://marhi.ru/AMIT/2019/2kvart19/PDF/10_pshenichnikova.pdf

References

1. Vedyakov I.I. *Kollektivnyj process. Sportivnye megaproekty. ChM-2018. Katalog proektov* [Collective process. Sports megaprojects. 2018 World Cup. Project Directory]. Ekaterinburg, Ustojchivoe razvitie Publ., 2015, 96 p.
2. Vimmer M. *Prakticheskoe posobie. Proektirovanie stadionov* [Project guide. Stadium design]. Berlin, Dom Publishers Publ., 2016, 320 p.
3. Eremeev P.G. *Sovremennye konstrukcii pokrytij nad tribunami stadionov* [Modern stadium covering structures]. Moscow, ASV Publ., 2015, 236 p.
4. Okeanov G.V. *Adaptacija arhitekturnyh reshenij bol'sheproletnyh svetoprozrachnyh pokrytij futbol'nyh stadionov Rossii k rabote v rezhime «nasledie»* [Adaptation of architectural solutions for long-span translucent covering of football stadiums of Russia to work in the "heritage" mode]. Industrial and civil engineering]. 2019, no. 5, pp. 4-13. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.05.04-13.
5. Leykina D.K., Okeanov G.V. *Arhitektura bol'sheproletnyh svetoprozrachnyh pokrytij futbol'nyh stadionov* [Architecture of largespan translucent covering of football stadiums. Industrial and civil engineering]. 2018, no. 6, pp. 9-16.
6. Ikonnikov A.V. *Funkciya, forma, obraz v arhitekture* [Function, form, image in architecture]. Moscow, Strojizdat Publ, 1986, 288 p.
7. Bush D.V. The Lessons of 2018 FIFA World Cup Stadium Design. Academia. Architecture and Construction. 2018, no. 2, pp. 5-10. Available at: <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2018-2-5-10> DOI 10.22337/2077-9038-2018-2-5-10
8. Schober H. *Transparent Shells, Form Topology Structure* Wilhelm Ernst&Sohn Publ. Berlin, 2015, 272 p.
9. Ermolov V.V. *Proshloe, nastoyashchee i budushchee pnevmaticheskikh stroitel'nyh konstrukcij* [Past, present and future of pneumatic building structures. Pneumatic building structures]. Moscow, Strojizdat Publ., 1983, pp. 5-46.
10. Orsa Yu.N. *Osobennosti arhitektury pnevmaticheskikh vozduhopornyh sooruzhenij. Pnevmaticheskie stroitel'nye konstrukcii* [Features of the architecture of pneumatic air structures. Pneumatic building structures]. Moscow, Strojizdat Publ., 1983, pp. 170-187.
11. Pshenichnikova K. Features of the Formation of Pneumatic Architecture in the XXI Century. Architecture and Modern Information Technologies, 2019, no. 2(47), pp. 150-170. Available at: https://marhi.ru/AMIT/2019/2kvart19/PDF/10_pshenichnikova.pdf

ОБ АВТОРЕ

Океанов Геннадий Вадимович

Аспирант, АО Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений «ЦНИИПромзданий», Москва, Россия
e-mail: g.oceanov@yandex.ru

ABOUT THE AUTHOR**Okeanov Gennadii**

Postgraduate Student of Central Scientific Research and Project Experimental Institute of Industrial Buildings and Constructions, Moscow, Russia

e-mail: g.okeanov@yandex.ru