

М.В. Коробова, Т.А.Наумова /
Maria Korobova, Tatiana Naumova

**Планарное остекление с использованием тросовых
несущих конструкций в общественных зданиях**
CABLE WALLS IN PUBLIC BUILDINGS

Ключевые слова: стальные тросы; канатная сеть; преднапряжение; остекление; несущая конструкция; ограждающая конструкция; прогиб.
Key words: steel cables; cable net; pretension; glazing; structure; cladding; deflection.

Being conceptually simple, one of the most exotic solution of support structures for facade glazing of public buildings is a cable net wall or simply a cable wall. This structure represent pretensioned cables or most frequently a web of cables that support and stabilize glass facades. Gravitational loads from the glass elements are carried through the attachment nodes to the

vertical cables. Lateral deformations due to wind and seismic loadings are resisted by each horizontal and vertical cable.

The main features of this structure are pretension of the cables and their deflection which is mostly limited by 1/50 of the shortest span. Concerning cable attachments at their intersections, two types are to be noted: simple clamps and spiders that demand glass drilling but are more effective in the long-term.

The first building ever constructed using the cable net wall is Hotel Kempinski in Munich erected in 1993. The cable-net wall is 40 m wide by 25 m tall. Another example is Beijing Poly Plaza which comprises office space, restaurants and even the 8 storey Poly Art Museum suspended within the cladding glass wall. The cable-net facade is 90 m tall and 60 m wide being one of the largest in the world. There an innovative solution is applied whereby the wall is additionally supported by four large diameter cables under significant pre-stress. These relatively stiff elements run diagonally along the surface from the roof of the museum up to the top of the atrium in a V-shape and effectively divide the wall into three small faceted sub-sections. It allows to limit the diameters of cables of cable net wall and the value of pretension.

One of the most recent examples of this technology is seen in new terminal building of airport Chhatrapati Shivaji in Mumbai inaugurated in February 2014. The longest cable wall in the world totalling over 1km in length and 11000 m² in area clads the terminal. However, instead of a traditional cable net wall the glass facade is supported only by unidirectional vertical cables, because, firstly, at the top level of the Headhouse there isn't a possibility of any horizontal anchorage points due to the lack of vertical supports on the periphery. Secondly, the wall follows the curvature of the plan of the Headhouse Roof, a feature only achievable because the cable wall consists solely of vertical cables.

As for reasons why this technique is rarely used, first of all, its demand for accuracy and precision during design and

construction should be mentioned as small changes of geometry can dramatically affect the cable tension, tension of the net or the fit-up if the glass. Secondly, you have to tense cables using special equipment – hydraulic jacks. Thirdly, a significantly complicated computer analysis is often needed. Fourthly, due to rarity of application standart solutions of cable net walls don't exist. Thereafter, the cost of design and construction is quite high.

But despite all these minuses cable walls still have some pluses on their side. Firstly, they are rather spectacular appearing almost totally transparent. Then this construction allows to increase insolation and reduce the electricity consumption during the day. Next, expected life cycle of cable walls is rather significant – 50 years on the average. Moreover, once construction is complete, the cable-net has relatively few requirements beyond occasional cleaning and tension monitoring. And the process of installation and pretension are relatively simple and fast.

In conclusion, it should be noted that the cable net walls are not widely used these days, but due to their spectacular features and efficiency cases of their application can become much more numerous and frequent.

В последние годы планарное остекление получило большое распространение при проектировании общественных зданий, так как оно обеспечивает возможность устройства светопрозрачных фасадов большой прочности. Существуют различные несущие конструкции для такого типа остекления: стальные трубчатые или вантовые преднапряженные фермы, системы стоек и ригелей, однако наиболее редко используемым, хотя и концептуально простым решением, являются тросовые несущие конструкции.

Суть данного метода заключается в натяжении преднапряженных стальных канатов, точнее, чаще всего сети

таких канатов, которые служат несущей конструкцией для остекления фасада и предотвращают его деформации. Собственный вес стекол передается через опорные детали на вертикальные тросы. Поперечные силы от ветровой и сейсмической нагрузок воспринимаются совместно и вертикальными, и горизонтальными элементами сети.

Главной особенностью технологии является преднапряжение несущих элементов остекления, так как тросы не способны сохранять геометрическую неизменяемость и, соответственно, жесткость и несущую способность без натяжения. Таким образом, предварительное напряжение определяется из условия отсутствия сжимающих напряжений в канатах при наихудших комбинациях нагрузок. Не менее важным моментом является максимальный допустимый прогиб, который оценивается не только с точки зрения целостности остекления, но и восприятия людей, причем последнее нередко служит ключевым фактором. Обычно прогиб ограничен величиной $L/40-L/50$, где L – наименьший размер фасадной стены относительно рассматриваемой точки. Прогиб можно значительно уменьшить, если придать ограждающей стене форму седловой поверхности (такие поверхности напоминают седло для верховой езды, и любая их точка имеет двоякую кривизну). Это достигается за счет изгиба вертикальных и горизонтальных тросов в противоположных направлениях. Тогда деформации от действия поперечных сил снижаются, так как, по сути, конструкция уже деформирована. Причем было установлено, что, по существу, конструкция работает как две отдельные сети, повернутые на 90 градусов друг относительно друга, каждая из которых воспринимает поперечные нагрузки в своем направлении. Одновременно опоры по каждому краю фасада должны нести половину нагрузки от ветра, действующего на всю поверхность остекления, что обуславливает необходимость обязательного выполнения граничных

условий как для жесткой заделки. По сравнению с плоскими фасадами жесткость изогнутых сетчатых фасадов настолько велика, что позволяет ограничить прогиб величиной $L/120$ или же снизить значения предварительного натяжения.

Обычно величина предварительного напряжения должна быть не менее чем в 1,1 раза больше расчетного сопротивления каната на прочность, что еще туже скручивает сам канат и уменьшает релаксацию в процессе эксплуатации.

Касательно крепежных элементов стекла к узлам сети, здесь можно выделить два типа: на зажимах и спайдерах (название данного элемента происходит от его своеобразной формы и английского слова «spyder» – паук). Самым распространенным креплением является спайдер с шаровым шарниром, так как он дает возможность стеклу поворачиваться относительно точки опоры под действием внешней нагрузки. При использовании спайдера стекло точечно опирается на его круглую головку через силиконовые прокладки. При этом требуется сверление стекла, что улучшает работу крепления, несмотря на возникновение концентрации локальных напряжений вблизи отверстия. Зажимы считаются более экономичным и менее трудоемким решением, так как нет необходимости в сверлении стекла, которое опирается на специальные консольные детали в узлах сети. Крепление фиксируется с наружной стороны планками. Прогиб и поворот стекла воспринимает уплотнитель в стыках.

Наибольшие перемещения конструкции возможны вблизи опор, что ведет к повреждению остекления, поэтому при проектировании особое внимание уделяется граничным условиям по краям сети, которые должны соответствовать жесткой заделке. Также не менее важным моментом является учет перемещений всего здания, так как они влияют на деформации опор тросов, особенно это касается больших по высоте остекленных фасадов.

Перейдем к конкретным случаям использования планарного остекления на тросовых несущих конструкциях. Впервые данная технология остекления фасадов была применена в 1993 г. в отеле Kempinski (Мюнхен). Размеры остекления составляют 40 м в ширину и 25 м в высоту. Конструкцией, несущей основную нагрузку, здесь являются горизонтальные предварительно напряженные канаты. Допустимый прогиб принят равным 900 мм.

Другим примером служит здание «Beijing Poly Plaza» (Пекин). Рассмотрим его подробнее.

Здание «Beijing Poly Plaza» служит штаб-квартирой крупнейшему государственному холдингу «China Poly Group Corporation», также в нем расположено множество офисов, ресторанов и даже 8-этажный музей «Poly Art Museum», который выступает из ограждающей стены. Этот фасад размерами 60 м в ширину и 90 м в высоту является одним из наибольших по площади примеров планарного остекления на тросовых несущих конструкциях. Однако уже на этапе проектирования величина данной конструкции вызвала серьезные проблемы. Предварительный расчет показал, что решение в виде стандартной сети из преднапряженных канатов крайне неэкономично. Более того, в таком случае потребовалась бы установка несущих металлических ферм, которые загородили бы весь обзор города. Вместо этого был использован инновационный подход, заключающийся в натяжении 4 тросов большого диаметра (сравните: диаметр тросов основной сети 34 мм, дополнительных тросов от 235 до 275 мм) и большего по сравнению с обычным значением предварительного напряжения. Эти относительно жесткие элементы идут от покрытия музея до верха атриума, образованного остекленным фасадом, который разделен на 3 секции своеобразной буквой V. По сути, эти тросы ограничивают перекрываемый пролет и, соответственно, создают дополнительные граничные условия для основной

сети. Таким образом, уменьшаются диаметры несущих канатов. Характерной особенностью дополнительных тросов является то, что первоначально они были прямолинейными, но в процессе предварительного напряжения тросов основной сети они изогнулись в сторону остекления.

По двум боковым сторонам устроено жесткое соединение остекленной стены с железобетонными диафрагмами. Сверху подобные граничные условия, которые сводят к минимуму прогибы и повороты на опорах, обеспечивает стальная ферма высотой 3 этажа, опирающаяся на вышеупомянутые диафрагмы.

Наибольший допустимый прогиб в данном случае составляет, как и в отеле Kempinski, 900 мм. Но результаты расчета указывали на то, что возможны большие деформации при воздействии значительных по значению ветровых нагрузок, что привело бы к кручению стеклопакетов относительно граней буквы V (т.е. тросов большого диаметра). Для ограничения угла поворота применили специальные шарниры – ратулы, соединенные стальными лучевыми кронштейнами с тросами сети.

Также при проектировании возникла проблема чрезмерных перемещений отдельных этажей здания под действием ветровых и сейсмических нагрузок. В этом случае диагональные тросы служат жесткими связями. С целью снижения нагрузки на них эти тросы отделили от фундамента здания, используя так называемый «кулисный механизм», работающий по принципу шкива.

Можно заключить, что уже в здании «Beijing Poly Plaza» проектировщики отошли от оригинального решения тросового сетчатого фасада. Это объясняется необходимостью каждый раз заново решать задачу учета местных условий и требуемых размеров конструкции. Однако есть случаи, когда требуется еще сильнее изменить первоначальную идею, чтобы ее приспособить под конкретное здание.

Рассмотрим новый терминал аэропорта Чатрапати Шиваджи (Мумбаи), который открылся в феврале 2014 года. В здании применено множество уникальных конструктивных решений: даже форма здания, напоминающая букву Х, была принята для того, чтобы прежний терминал мог продолжать работу во время строительства нового здания. Оригинальностью отличается и решение ограждающих конструкций. По периметру здания был запроектирован полностью остекленный фасад на тросовых несущих конструкциях, однако, в отличие от стандартной сети перекрещивающихся тросов, здесь применены лишь вертикальные несущие стальные канаты, на которые крепятся стеклопакеты. Что привело к такому решению? Во-первых, на верхнем уровне основной секции по периметру этажа отсутствуют несущие вертикальные конструкции, к которым можно было бы крепить горизонтальные тросы. Во-вторых, такое ограждение повторяет криволинейную форму здания, что было бы невозможно при устройстве стандартного сетчатого фасада.

Следует упомянуть про основные особенности данного ограждения. Это самый большой по длине и по площади тросовый сетчатый фасад в мире протяженностью более 1 км и площадью 11000 м². Высота фасада основной секции варьируется от 4 до 15 м, так как только под этой секцией запроектированы 4 отдельных фундамента, внешняя стена разделена на независимые блоки деформационными швами.

По двум сторонам основной секции (Headhouse) покрытие имеет вылет 40 м относительно крайних колонн. Такие консольные вылеты характеризуются значительными прогибами, что может привести к потере напряжения в тросах, установленных по контуру здания. Соответственно, они перестали бы работать как несущие конструкции стеклопакетов. Для решения данной проблемы устроен

вспомогательный каркас: были установлены жестко заделанные в фундамент колонны, соединенные ригелями сверху и внизу ограждающей стены. На ригели крепятся стальные канаты. Через демпферы покрытие соединяется сбоку с верхом колонн. Такая конструкция позволяет сохранить преднапряженное состояние в тросах, одновременно обеспечивая возможность различных перемещений в пределах надземной части терминала.

Северный остекленный фасад пересекается с другими под острым углом. Учитывая допустимые прогибы для тросов, в итоге в этих местах можно ожидать соударения стен. Для предотвращения этого тросы соединены с вспомогательными угловыми колоннами горизонтальными планками, играющими роль ребер жесткости.

Несмотря на такое количество сложностей, главной проблемой при проектировании данного планарного остекления было предотвращение деформации стеклопакетов. Такая деформация происходит, если хотя бы одна сторона прямоугольного стеклопакета не лежит в одной плоскости с остальными, что ведет к повреждению уплотнителя между стеклами. Во внимание был принят допустимый сдвиг стеклопакета, и в итоге прогиб из плоскости был ограничен размером $L/100$, где L – короткая сторона стеклопакета. Соответственно, для предотвращения потери плоской формы деформирования наибольшие напряжения в канатах были достигнуты в местах с резким изменением геометрической формы, как, например, в углах здания.

Итак, приходим к выводу, что тип остекления на тросовых конструкциях обладает определенными и достаточно значительными *недостатками*. Разберем самые очевидные из них по пунктам.

Во-первых, при проектировании и последующем устройстве тросового фасада необходимо соблюдать

повышенную точность расчетов и определения размеров элементов. Малейшие геометрические отклонения в размерах способны сильно повлиять на значение предварительного напряжения каната, всей сети или на сам стеклопакет, так как стекло может в таком случае не иметь опирания по одной или нескольким сторонам.

Во-вторых, для обеспечения предварительного натяжения требуется специальное оборудование – гидравлические домкраты.

В-третьих, несмотря на изначальную простоту концепции (так, плоский фасад с остеклением на тросах, идущих в одном направлении, можно рассчитать вручную), часто требуются сложнейшие компьютерные программы, позволяющие рассчитать фасад криволинейной формы, с резкими изменениями геометрии, с граничными условиями, отличающимися от жесткой заделки. Следует учесть, что такие ограждающие конструкции характеризуются нелинейными деформациями при нагрузке, действующей из плоскости конструкции. При этом возникает необходимость рассмотрения всех нагрузок и всех комбинаций загрузки по отдельности и увеличивает количество расчетов.

В-четвертых, ввиду редкого использования данного типа остекления отсутствуют типовые решения, и, по существу, приходится каждый раз заново разрабатывать всю документацию, все технологические карты без опоры на предыдущий опыт.

В-пятых, из всего вышесказанного вытекает, что рассматриваемые ограждающие конструкции отличаются повышенной дороговизной и трудоемкостью при их проектировании. Однако все это относительно, поэтому теперь рассмотрим преимущества тросовых фасадов.

В первую очередь, самым очевидным *преимуществом* является *эффективность* данного конструктивного решения: такой фасад производит впечатление почти невесомого, он

визуально увеличивает пространство, позволяет повторить даже криволинейный контур здания.

Затем, полностью остекленная светопрозрачная ограждающая стена с минимумом несущих конструкций увеличивает инсоляцию помещений, что экономит электроэнергию в дневное время суток и позволяет приблизиться к выполнению требований устойчивого развития.

Далее, такое планарное остекление характеризуется достаточно большим сроком службы (в среднем, 50 лет). Более того, в процессе эксплуатации требуется, в основном, лишь периодическая очистка стекол и проверка состояния тросов (примерно раз в пять лет).

Говоря о возведении сетчатого фасада, следует отметить относительную быстроту и простоту технологии. При условии точной установки крепежных элементов по краям будущей стены процесс может быть описан довольно кратко: тросы подвешиваются, натягиваются, а затем соединяются в узлах пересечения. Причем если подготовка к преднапряжению тросов занимает до нескольких недель, то само натяжение ограничивается порой несколькими часами.

Таким образом, несмотря на довольно большой срок существования данной технологии, планарное остекление на тросовых несущих конструкциях остается инновационным решением, которое, однако, благодаря своей эффектности и эффективности, способно занять значительную нишу на рынке строительства.

Список использованных источников

1. [Электронный ресурс] Archinect News. SOM-designed Mumbai Airport Terminal 2 celebrates its inauguration <http://archinect.com/news/article/91157264/som-designed-mumbai-airport-terminal-2-celebrates-its-inauguration> [дата обращения 10.04.2014]

2. [Электронный ресурс] Archdaily. Chhatrapati Shivaji International Airport – Terminal 2 / SOM
<http://www.archdaily.com/477107/chhatrapati-shivaji-international-airport-terminal-2-som/> [дата обращения 13.04.2014]
3. [Электронный ресурс] Modern Steel Construction. Aaron Mazeika, Kieran Kelly-Sneed «Getting started with cable-net walls»
http://www.modernsteel.com/Uploads/Issues/April_2007/30764_cable-net.pdf [дата обращения 15.04.2014]
4. [Электронный ресурс] PR Newswire «Nouvel aéroport de Mumbai, conçu par Skidmore, Owings & Merrill, inauguré aujourd'hui»
<http://www.prnewswire.com/news-releases/nouvel-aeroport-de-mumbai-concu-par-skidmore-owings--merrill-inaugure-aujourd'hui-239752211.html> [дата обращения 14.04.2014]
5. [Электронный ресурс] SOM: Skidmore, Owings & Merrill LLP. Charles Besjak, Preetam Beswas, Alexandra Thewis, Raymond Sweeney, Damayanti Chaudhuri «Chhatrapati Shivaji International Airport-Integrated Terminal Building»
<http://www.som.com/FILE/17669/chhatrapatishivajistructuralengineeringinternationaljournal.pdf> [дата обращения 15.04.2014]
6. [Электронный ресурс] Конструкции планарных фасадов | Федеральный строительный рынок <http://i-stp.ru/archive/1298>
[дата обращения 15.04.2014]
7. [Электронный ресурс] Словари и энциклопедии на Академикe
<http://translate.academic.ru/> [дата обращения 15.04.2014]
8. [Электронный ресурс] Черемхина Е.А., Чесноков А.Г. «Введение в планарное остекление»
http://www.glassinfo.ru/articles/2004_09_vvedenie_v_planarnoe_osteklenie.pdf [дата обращения 11.04.2014]