

ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВОЗВЕДЕНИЯ НЕБОСКРЕБА BURJ DUBAI*

Небоскреб Burj Dubai (Бурдж Дубай, в переводе с арабского — «Дубайская башня») высотой 818 м в настоящее время является самым высоким в мире сооружением, созданным руками человека. В период его возведения геодезической службой было решено много сложнейших технических и инженерных задач. Традиционные методы геодезического обеспечения строительства не могли удовлетворить технологический процесс возведения башни по многим параметрам: точности, надежности, скорости и достоверности получения результатов. Была разработана принципиально новая технология геодезического обеспечения строительства высотного сооружения и применены абсолютно новые методы наблюдения за динамикой деформационных процессов, происходивших при возведении башни.

▼ Конструкция здания Burj Dubai

Здание Burj Dubai является центральным звеном широко-масштабного проекта, который включает отели, парковые зоны, торговую галерею Dubai Mall и рукотворное озеро Burj Dubai. Сама башня предназначена для размещения отелей, частных резиденций, офисов и роскошных апартаментов.

Строительство этого уникального сооружения осуществлял генеральный подрядчик — компания Samsung

Engineering & Construction (ОАЭ) — в партнерстве с компаниями Besix (Бельгия) и Arabtec (ОАЭ). Проект изобилует интересными планировочными и инженерно-техническими решениями, сложными с точки зрения логистики схемами доставки и хранения строительных материалов и оборудования. За восемь месяцев до окончания строительства, когда основные работы были завершены, на объекте ежедневно работало 9800 человек.

Burj Dubai включает большое количество крупных конструктивных элементов и имеет сложную планировку (рис. 1). Фундамент башни представляет собой около двухсот железобетонных столбов диаметром 1,5 м, заложенных на глубину более 50 м, которые поддерживают массивную железобетонную плиту толщиной 3,7 м. Конструктивно сооружение состоит из трех независимых флигелей (крыльев), установленных под углом 120° к центральной оси башни. Флигели здания и центральная часть ядра жесткости механически связаны между собой консольными балками на нескольких технических этажах. Каждый флигель постепенно сужается кверху, в форме «трехгранного штыка». Бетонные плиты полов-перекрытий капитально связаны со стенами ядра жесткости. Выносные плиты карнизов позволяют перераспределять возникающую

нагрузку или передавать ее на вуты (утолщения) несущих балок. Большинство стен являются важными несущими



Рис. 1
Общий вид здания Burj Dubai. Фото JO Lee

* Статья подготовлена А.И. Яценко («Фирма Г.Ф.К.») на основании перевода материалов, предоставленных компанией Leica Geosystems («Constructing the Burj Dubai», автор Doug Hayes, главный геодезист компании Samsung Engineering & Construction).

конструктивными элементами здания. Толщина основных стен составляет около 600 мм, а несущие колонны оконечности флигелей имеют диаметр 2,5 м. До 156-го этажа башня выполнена из железобетона.

Во время строительства башни было поставлено несколько рекордов.

За один подъем бетонная смесь с помощью насоса высокого давления доставлялась на высоту 605 м от нулевой отметки.

На бетонном основании 156-го этажа была смонтирована массивная металлоконструкция высотой более 200 м, которая удерживает шпиль высотой 140 м, представляющий собой высокую стальную трубу весом более 400 т.

В здании Burj Dubai и его цокольной части было установлено более 65 лифтов, которые перемещаются между различными этажами. Лифты имеют одно- и двухэтажные кабины, некоторые из них — самые скоростные в мире. Часть скоростных лифтов поднимается на высоту более 500 м с нагрузкой до 4,5 т.

Отделка наружного фасада выполнена из закаленного стекла с алюминиевым напылением. Более 23 500 полированных стеклопакетов было поднято на башню для остекления 145 000 м² фасада. Служба логистики, участвующая в строительстве, своевременно обеспечивала доставку огромного количества материалов и элементов конструкции от многочисленных поставщиков, транспортных компаний, с портовых складов, временных участков хранения, а порой и «с колес».

▼ Особенности геодезического обеспечения строительства башни

Каждые три дня монтировался один этаж. Это задавало темп, которому подчинялись

все технологические процессы, включая изготовление и доставку материалов и конструкций, заливку бетонной смеси и, конечно, геодезическое обеспечение.

Первостепенной задачей, стоящей перед геодезической службой, был вынос в натуру и задание планового положения высотных отметок ядра жесткости, которое отливало одновременно на 9 участках. Работы проводились 24 часа, по-прежнему, 6 дней в неделю.

Следует отметить, что на любом строящемся объекте часто ощущается нехватка времени для выполнения разбивочных работ на монтажном горизонте и установки щитов «скользящей» опалубки. В данном случае каждый монтажный элемент нужно было установить с максимальной точностью, чтобы башня «поднималась» непрерывно без отклонений от «сглаженной» средней вертикали конструкции. Все отклонения железобетонных элементов от вертикальности или «уход от осей» границ плит могли иметь серьезные последствия при возведении следующих этажей, перегородок и лифтовых шахт. Невозможно в денежном эквиваленте оценить стоимость переделок, которые могли возникнуть из-за ошибок при задании осей или высотных отметок.

В большинстве случаев геодезические работы при возведении здания проводились в условиях, когда рабочая зона на монтажном горизонте была перенасыщена материалами, оборудованием, работающими грузоподъемными механизмами и персоналом. Особый отпечаток накладывали требования по технике безопасности при выполнении высотных работ. Эти факторы заметно осложняли проведение геодезических работ на монтажном горизонте, основными из которых явля-

лись: разбивка и установка осей колонн и балок, стен, проемов и лифтовых шахт, разметка контура остекления. Кроме этого, геодезическими методами осуществлялся мониторинг деформаций и динамических процессов, происходивших на сооружении, для определения значений текущих и прогнозируемых параметров поведения объекта и обнаружения непредвиденных отклонений.

▼ Динамика пространственного положения сооружения

Начиная измерения на нижних этажах, следовало осознавать, что с увеличением высоты здание будет совершать колебательные движения. Важно было определить и предвидеть в процессе возведения сооружения величину планового смещения как будущего верха здания, так и элементов конструкции на текущем монтажном горизонте относительно проектных осей. До строительства Burj Dubai были проведены исследования и необходимые консультации по оценке ожидаемых направлений и величин смещений, периодов и амплитуд колебания башни, найден «ветровой туннель» на основе данных анализа «розы ветров». В процессе строительства происходило дальнейшее непрерывное изучение поведения башни. По результатам значительного объема натурных наблюдений были разработаны способы мониторинга конструкций и методы анализа поведения сооружения и его отдельных элементов, способы коррекции текущего смещения, определены допустимые значения колебаний башни. Эти работы выполнялись с сознанием того, что геодезические измерения по контролю вертикальности строящейся башни на монтажном горизонте будут осуществляться

на постоянно движущемся основании, поскольку конструкция башни не остается жесткой и статичной.

Колебания и смещения сооружения являлись результатом поведения материалов конструктивных элементов и множества других внешних воздействий, одновременно действующих на конструкцию. Они были различны по времени воздействия и могли быть вызваны многими причинами. Так, например, некоторые смещения происходили в течение нескольких недель. Нагрузки на фундаментную плиту из-за последовательности технологических операций становились причиной различных по величине осадок. Даже при незначительной величине деформации основания проявлялось значительное смещение верхней части высотного здания. Различные по величине сжатия (деформационные осадки) противоположных сторон несущих стен ядра жесткости также становились причиной начала незаметного наклона башни в процессе строительства.

Определенное дестабилизирующее влияние на пространственное положение башни оказывали внешние факторы. Так, из-за солнечного излучения происходил ежедневный циклический разнотемпературный нагрев конструкции, вызывая хотя и малые изменения величины смещения башни от вертикали, но действующие в определенном направлении. Высокочастотные колебания сооружения были связаны с ветровой нагрузкой, с деятельностью грузоподъемных механизмов и комбинацией нерегулярных динамических сил, которые периодически воздействовали также и на геодезические приборы. Например, от устойчивого ветра средней си-

лы фиксировалось смещение 108-го этажа (отметка 375 м) на 0,53 м, а 153-го этажа (отметка 569 м) — на 1,25 м.

По мере увеличения высоты башни возрастали значения смещений. С другой стороны, смещения и колебания значительно уменьшались с ходом строительства. Например, после соединения укрепляющих балок на определенных технических этажах величина смещений уменьшилась в несколько раз, поскольку в результате соединения конструкции в единое целое башня становилась значительно жестче.

▼ Управление вертикальностью

В процессе строительства геодезические работы становились больше похожими на управление вертикальностью каждого отдельного простого элемента сооружения по отношению к общей вертикали путем коррекции положений, но со строгим ограничением по величине коррекции, по мере увеличения высоты конструкции. Это нужно было делать, пока колебания конструкции находились в заданных пределах. Так, например, требовался контроль за положением и состоянием строительных лесов и подмостков через каждые тридцать и более этажей. Движение и колебания здания являлись причиной смещения измерительного оборудования, и поэтому точные координаты контрольных точек были известны только в конкретное время наблюдения и/или во время нового повторного наблюдения.

На сооружениях повышенной этажности использовать метод оптического отвеса нецелесообразно, поскольку он требует большого количества сквозных технологических отверстий в плитах перекрытий и наличия свободной оптической

видимости для визирования.

Конструктивно здание Burj Dubai имеет 9 зон со своими ядрами жесткости и осями, на каждой из которых проводился отдельный независимый геодезический контроль. Темпы строительства не оставляли достаточного времени на построение и передачу информации от опорных точек планово-высотного обоснования традиционными геодезическими методами.

▼ Спутниковые и геодезические измерения

Компания Leica Geosystems (Швейцария) предложила технологию, включающую использование высокоточного спутникового и геодезического оборудования, измерения которым выполнялись на верхней части башни — монтажном горизонте, инклинометров (датчиков наклона), устанавливаемых стационарно на определенных этажах, и программно-аппаратного комплекса для



Рис. 2

Расположение высокоточного геодезического спутникового оборудования на верхней части скользящей опалубки

совместной обработки всей информации в стационарном геодезическом офисе, располагавшимся рядом со строительной площадкой. Это потребовало создания новых и независимых решений для геодезического обеспечения каждого участка бетонных работ.

Разработанная технология подразумевала использование трех комплектов спутниковых геодезических ГЛОНАСС/GPS-приемников Leica GX1230 с антеннами AX1202, располагавшимися на верхней части щитов «скользящей» бетонной опалубки (рис. 2). Антенны приемников были установлены соосно с круговыми (360°) призмами, которые давали возможность выполнять измерения на них электронными тахеометрами. На каждом монтажном горизонте, где проводились бетонные работы, определялись пространственные координаты необходимых точек, которые подкреплялись измерениями азимута на удаленную точку, установленную на одном

**Рис. 4**

Определение координат опорных точек на монтажном горизонте

**Рис. 3**

Измерения на контрольных опорных точках монтажного горизонта

из высотных зданий.

На объекте строительства была установлена постоянно действующая базовая станция в составе спутникового приемника Leica GRX1200 и антенны AT504, которые работали под управлением программы Leica GNSS Spider. С помощью геодезических спутниковых приемников на каждом монтажном горизонте проводились часовые наблюдения в режиме «кинематика-на-лесту» (kinematic-on-the-fly). В это же время выполнялись другие геодезические измерения с помощью электронного тахеометра и устанавливались опорные точки для последующих бетонных работ на этом этаже (рис. 3). Кроме того, проводились измерения пространственного положения электронного тахеометра методом обратной геодезической засечки (рис. 4), и по методу наименьших квадратов вычислялись его точные координаты.

Работа кранов и большое количество окружающих конструкций над антеннами спутниковых приемников являлись причиной искажений и пропадания сигнала, а также возникновения фазовых искажений от переотраженного сигнала. Для уменьшения их влияния

антенны размещались на высоких штангах над вертикальными стенами. Кроме того, результаты ГЛОНАСС/GPS-измерений при обработке фильтровались для исключения некачественных данных.

Несмотря на то, что при определении пространственного положения антенн спутниковых приемников точность составляла меньше 10 мм, для геодезического контроля использовались только плановые координаты, измеренные спутниковым методом.

▼ **Измерение пространственного положения башни инклинометрами**

Поскольку сооружение все время двигалось относительно своей вертикальной оси, точные пространственные координаты точек, определенные с помощью спутниковых приемников в конкретный момент времени, необходимо было «относить» к плановым осям сооружения, которые также нужно было знать на этот момент. Это было непростой задачей, так как ни одна точка конструкции не могла быть измерена повторно, потому что верх здания постоянно надстраивался. Все леса и помосты, которые использовались для опорных точек, были неразрывно связа-



Рис. 5
Общий вид инклинометра

ны с верхом щитов «скользящей» опалубки, постоянно перемещающихся гидравлическим домкратом. Поэтому опорная точка на горизонтальном или вертикальном опалубочном щите или на вертикальной стенке была нестабильна и перемещалась во время движения опалубки.

Для измерения пространственного положения башни на первых 156 этажах железобетонной конструкции сооружения было установлено восемь инклинометров — электронных двухосевых датчиков (рис. 5). Инклинометры смонтировали на кронштейнах, закрепленных на стенах ядра жесткости центральной части башни. Эти датчики позволяют измерять наклон по двум взаимно перпендикулярным направлениям с точностью до 0,2" (2,5 мм на 1 км) и могут передавать информацию о величине наклона в цифровом виде через последовательный порт в режиме реального времени с частотой 1 Гц (одно измерение в секунду). Датчики с помощью кабеля были объединены в единую локальную компьютерную сеть. Программа Leica GNSS QC, установленная на компьютере в офисе, избирательно опрашивала каждый инклинометр, сохраняла и конфигурировала данные от всех датчиков в часовые файлы с секундным интервалом. Это

позволяло по известной высоте установки инклинометров и измеренным значениям их наклона вычислять среднее отклонение возведенного верха башни от вертикали в каждый период времени (принцип «бамбукового удилица»). В любой момент времени можно было определить плановое положение верха конструкции с точностью до 10 мм. Такая точность измерений не знает аналогов и была достигнута благодаря тщательной калибровке каждого инклинометра.

На основе этих данных и измеренных с помощью спутникового оборудования координат проводилась коррекция положения каждого элемента опалубки в соответствии с проектом на краткосрочный период. Другими словами, определялись координаты конструкций, которые будут соответствовать положению башни после прекращения внешних воздействий, в предположении, что конструкция вернется в это положение, когда внешние воздействия изменятся и примут нормальные значения.

Эта комбинированная система измерений использовалась

с начала проведения строительных работ, практически, с «нулевого уровня», еще до того, как стало происходить наглядное проявление смещений или колебаний. Она была проверена традиционным методом — методом обратной геодезической засечки на контрольную точку. Полученные при проверке положительные результаты были важным этапом, поскольку они не только подтвердили качественно новый метод геодезического контроля возведения столь сложного сооружения, но, главное, вселили уверенность в правильности разработанной технологии.

Со временем были подобраны оптимальные способы фильтрации данных, улучшена обработка потока данных и их представление, а также методы проверки качества и целостности данных. Разработанная технология сделала геодезическое обеспечение строительства башни простым и «прозрачным» процессом, позволила предоставлять исходные данные и осуществлять контроль монтажных и бетонных работ в условиях ограниченной видимости и при любых погодных условиях без необходимости



Рис. 6
Монтажные работы при установке стальной конструкции надстройки и шпиля (фото Lee In Ku)

перерывов работы грузоподъемных механизмов.

▼ Монтаж верхней части металлоконструкции и шпиля

На железобетонном основании на уровне 156-го этажа было необходимо установить стальную конструкцию надстройки и шпиль, которые вместе имели высоту 250 м. Шпиль, длиной более чем 140 м, собирался внутри этой конструкции как продолжение вертикальной трубы и поднимался системами блоков на 87 м, чтобы верхняя точка шпиля достигла отметки, равной 818 м.

После установки металлоконструкции были сняты помосты и леса, что позволило освободить место для установки шпиля на верхнем основании металлоконструкции (рис. 6). Невзирая на значительные колебания здания Burj Dubai, используя оптический отвес и все строительное искусство, монтаж шпиля был удачно завершен. В заключении были проведены испытания колонн металлоконструкций и шпиля на вертикальность и отсутствие прогиба. Сборка металлоконструкции надстройки и шпиля заняла около 19 месяцев.

▼ Геодезический мониторинг

При строительстве для обеспечения инженеров и проектировщиков информацией о фактическом состоянии возводимого объекта и оценки соответствия ее проектной документации проводился геодезический мониторинг. Мониторинг оказывает бесценную помощь в понимании процессов, постоянно происходящих в конструкции, вызывающих смещения и усадочные деформации.

Комбинация геодезических и спутниковых измерений в сочетании с точными данными датчиков наклона дала воз-

можность на всем протяжении строительства определять пространственные координаты башни, изучать смещения ее отдельных элементов и конструкции в целом во времени и предоставлять точные прогнозы о ожидаемом пространственном положении всего сооружения. Для удаленного и постоянного мониторинга при строительстве башни были созданы и применены программы деформационного и динамического анализа.

Постоянно наблюдались долго- и среднепериодические боковые смещения верха башни, а также периоды и амплитуды короткопериодических колебаний. Фильтрация данных, полученных за длительный период, обеспечивала ежедневное отслеживание смещений, вызванных воздействием ветра, грузоподъемных механизмов и солнца, позволяя отбраковывать некачественные данные (пропускать их или включать частично). Кроме того, разрабатывались и совершенствовались методы регистрации смещений верха здания от воздействия солнечного излучения. Измеренные данные в короткие периоды времени анализировались для выявления высокочастотных колебаний конструкции. Особенно тщательно анализировались данные воздействия сильных ветровых нагрузок или землетрясений. Была обнаружена важная информация о поведении башни.

В течение строительства также проводились наблюдения других непрерывных деформаций, которые отражались на поведении материалов и происходили в результате как краткосрочных, так и длительных нагрузок на всех стадиях возведения башни. Ядро жесткости и бетонные колонны эластично сжимались, как только

бетон подвергался мгновенным или длительным нагрузкам. Это происходило незаметно, раз за разом. Длительные и внимательные наблюдения позволили оценить скорость сжатия элементов и сравнить ее с расчетной. По результатам наблюдений к высоте каждой межэтажной плиты были добавлены несколько миллиметров компенсации.

Другие регулярные наблюдения включали высокоточное нивелирование фундаментной плиты, которая длительно и неравномерно нагружалась, для определения ее осадок и наклон. Кроме того, анализировались и сравнивались с проектными значениями величины деформаций плит перекрытий.

Следует отметить, что в данной статье дано лишь краткое описание возможностей новой технологии геодезического обеспечения строительства высотных сооружений, которая была использована при возведении здания Burj Dubai. Использование новых методов мониторинга, наряду с традиционными, позволило с высокой точностью контролировать поведение сооружения.

Высокое качество строительства небоскреба Burj Dubai было достигнуто благодаря усилиям всех участников строительного процесса.

RESUME

A new technology of the geodetic support of tall structures construction is introduced. This technology is based on the use of the GLONASS/GPS satellite receivers, geodetic equipment and inclination sensors. It was implemented for the Burj Dubai building erection. It is noted that the technology developed has provided for geodetic control and monitoring of all the construction operations under the conditions of restricted visibility and in all weathers.