

Лахта Центр: Автоматизированная система мониторинга деформаций основания и фундамента.

В.И. Травуш, ГОРПРОЕКТ, Москва
А.М. Шахраманьян, СОДИС ЛАБ, Москва
Ю.А. Колотовичев, СОДИС ЛАБ, Москва
А.И. Шахворостов, ИНФОРСПРОЕКТ, Москва
М.А. Десяткин, ИНФОРСПРОЕКТ, Москва
О.А. Шулятьев, НИИОСП им. Герсевича, Москва
С.О. Шулятьев, НИИОСП им. Герсевича, Москва

20 сентября 2018 г.

Аннотация

В статье приводятся общие сведения о проектных решениях по внедрению системы автоматизированного мониторинга напряженно-деформированного состояния конструкций (СМДС) Башни МФК «Лахта Центр». Обобщен опыт проектирования, монтажа, наладки и эксплуатации системы мониторинга деформаций несущих конструкций Башни во время её возведения. Приведены результаты сопоставления расчетов ряда ответственных конструкций с данными инструментального мониторинга.

Введение

Многофункциональный общественно-деловой комплекс МФК «Лахта Центр», возводимый на берегу Финского залива в черте Санкт-Петербурга, стал самым высоким небоскребом в Европе. Высота Башни, входящей в состав комплекса, составляет 462 метра.

Для повышения безопасности возведения и эксплуатации уникальных зданий МФК в рамках проведения научно-технического сопровождения (НТС) строительства был организован комплекс мероприятий по постоянному мониторингу напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций Комплекса.

Основная цель проведения мониторинга – минимизировать вероятность возникновения аварийных ситуаций, связанных с возможным исчерпанием механической прочности и устойчивости основных несущих конструкций.

Для проведения мониторинга зданий МФК была спроектирована автоматизированная система мониторинга деформационного состояния (СМДС), объединившая воедино системы геотехнического мониторинга, деформаций коробчатого фундамента (КФ), мониторинга высотной части Башни, мониторинга конструкций многофункционального здания (МФЗ) и входной Арки. Разработка концепции мониторинга фундаментов и надземной части Башни была выполнена совместно специалистами SAMSUNG C&T, «ГОРПРОЕКТ», «СОДИС ЛАБ», «ИНФОРСПРО-

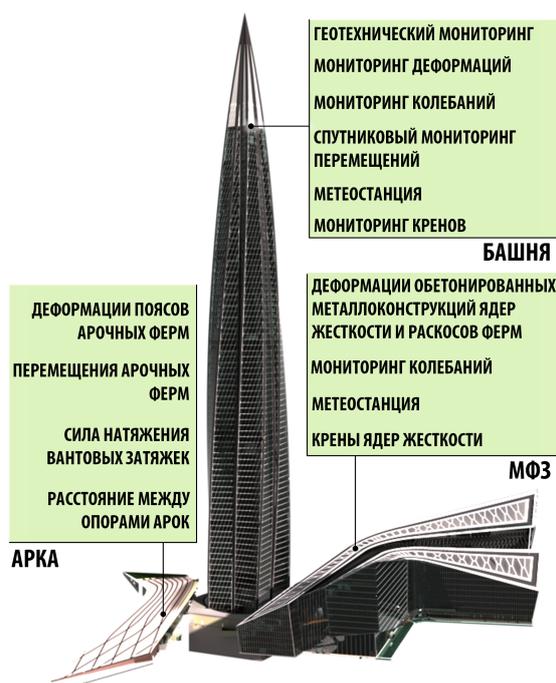


Рис. 1: Система автоматизированного мониторинга МФК «Лахта Центр»

ЕКТ» и НИИОСП им. Н.М.Герсевича в 2015 году. В результате совместной работы была утверждена программа мониторинга (рис. 1).

С 2013 года был установлен режим периодического ручного геотехнического мониторинга основания. В 2015 году, с началом возведения фундаментных конструкций, на-

чались работы по периодическому мониторингу деформации КФ, которые продолжались вплоть до запуска автоматической системы сбора данных в мае 2016 года, позволившей осуществлять автоматизированный сбор и передачу данных мониторинга в удаленный штаб строительства для работы профильных специалистов.

Впоследствии, по мере возведения конструкций Башни, к автоматической системе подключалось новое измерительное оборудование, охватившее на момент написания настоящей статьи более 80% конструкций от общего числа, предусмотренного программой. После завершения строительства система мониторинга будет интегрирована с системой управления зданием (BMS) и пополнится рядом измерительных систем (рис. 5), которые будут способствовать безопасной эксплуатации уникальных зданий МФК.

Данная статья обобщает опыт внедрения автоматизированной системы мониторинга деформаций несущих конструкций высотного здания во время строительства, масштабы которой не имеют аналогов в отечественной строительной практике.

Краткие сведения об объекте мониторинга

Башня «Лахта Центра» имеет 3 подземных и 86 надземных этажей. Форма здания закрученная конусообразная. Плиты перекрытий выполнены в форме 5 квадратных «лепестков», соединенных между собой круглым центральным ядром. По мере увеличения высотной отметки квадратные «лепестки» оборачиваются вокруг своей оси против часовой стрелки, а их площадь уменьшается.

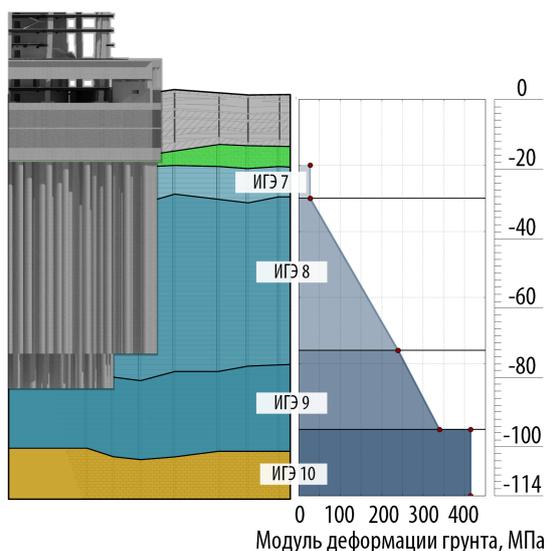


Рис. 2: Инженерно-геологические условия площадки строительства

Проект Башни потребовал от его разработчиков решения большого количества сложных инженерных задач. Одной из них было проектирование конструкций фундамента в условиях присутствия у поверхности глинистых грунтов невысокой несущей способности. Поэтому, нагрузку от сооружения было решено передавать с помощью свай на твердые вендские глины (ИГЭ-7...9 на рис. 2), залегающие на глубине около 20 метров с модулем деформации, увеличивающимся с глубиной от 28 МПа до 340 МПа (правая часть рис. 2), особенностью которых является наличие реологических свойств, способных увеличить конечную осадку сооружения на 23%.

В соответствии с проектными решениями, наиболее нагруженной частью сооружения является центральное ядро, через которое передается до 70% нагрузки от сооружения. Для компенсации неравномерной нагрузки на основание было принято решение об устройстве 264 буронабивных свай диаметром 2 м и различными длинами 55 м и 65 м. Более глубокие сваи расположили под центральным ядром для создания дополнительной жесткости (рис. 3).

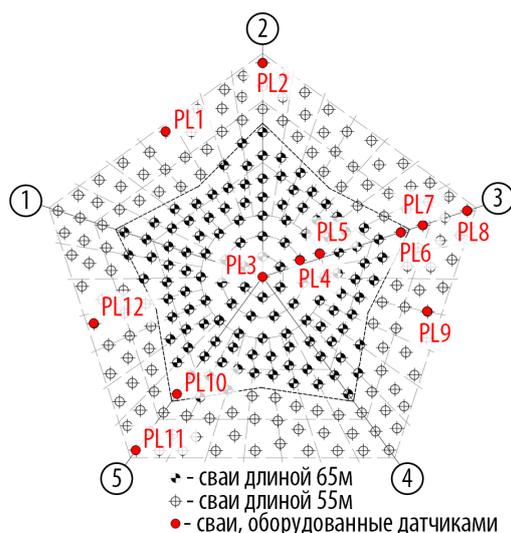


Рис. 3: Схема расположения свай

Значительная часть веса здания приходится на небольшой участок диаметром 26 метров, ограниченный круглым центральным ядром. Непосредственная передача этой нагрузки на грунт создала бы давление до 6.5 МПа. Для увеличения площади передачи нагрузки на основание и сохранения приемлемой разности осадок был спроектирован коробчатый фундамент (КФ), состоящий из двух плит толщиной 3.6 м (нижняя), 2 м (верхняя) и 10 диафрагм толщиной 2.5 м. При изготовлении КФ был применен высокопрочный бетон класса В60.

Конструктивная схема здания – каркасно-

ствольная. Основные несущие конструкции – центральное железобетонное ядро и 10 сталежелезобетонных колонн по периметру, соединенных между собой аутриггерными этажами, повышающими жесткость здания и его устойчивость к прогрессирующему обрушению. Аутриггеры запроектированы в виде железобетонных балок-стен, с установленными в тело железобетона стальными фермами. В вертикальных конструкциях надземной части применен бетон класса В80.

Сталежелезобетонные колонны состоят из металлического сердечника и обетонировки, дополнительно армированной гибкой стальной арматурой.

Шпиль башни – стальной, запроектирован в виде пятигранной пирамиды, расположенной вокруг центрального ядра, и опирающейся на перекрытие 83 этажа (L83) на отметке +344.400 в местах расположения композитных колонн. Высота шпиля – около 118 метров, ширина грани у основания пирамиды шпиля – около 16.3 метра.

Основные расчеты строительных конструкций Башни выполнены в программном комплексе «ЛИРА-САПР», геотехническая часть моделировалась в ПК «PLAXIS 3D». Проверочные расчеты выполнялись в ПК «SOFiStiK». Наряду с гравитационными при расчете здания определяющими были ветровые нагрузки, для изучения которых проводилось исследование масштабной модели в аэродинамической трубе.

Строительство небоскреба было начато в октябре 2012 года с изготовления опытных свай и ограждающей конструкции котлована. При строительстве надземной части Башни активно использовались передовые технологии возведения. Изготовление центрального ядра шло с опережением возведения периметральных конструкций в среднем на 5-7 этажей. Монтаж шпиля был завершен в начале 2018 года.

Мониторинг надземной части Башни

Надземная часть Башни оборудована автоматизированной системой мониторинга относительных деформаций, состоящей из 1257 струнных тензометров различного типа. С их помощью, производятся измерения осевых деформаций композитных колонн на типовых этажах, вертикальных и горизонтальных деформаций стен железобетонного ядра, комплексный мониторинг деформации аутриггерных ферм и металлоконструкций шпиля (рис. 4). Система вводится в эксплуатацию поэтапно (рис. 13) в процессе возведения несущего каркаса.

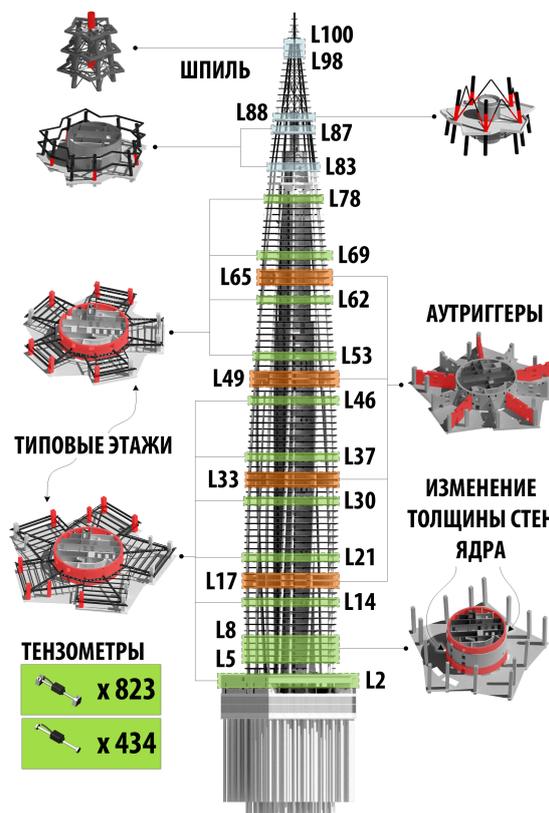


Рис. 4: Система мониторинга деформации конструкций надземной части Башни.

На рисунке 5 приведена схема расположения измерительного оборудования, установленного в надземной части здания в дополнение к системе мониторинга деформаций.

Контроль крена Башни в двух плоскостях, необходимый в том числе для нормальной эксплуатации лифтового оборудования и фасадных систем, производится с помощью 26-и высокоточных наклономеров «Leica Nivel 220», установленных на аутриггерных этажах и конструкциях шпиля;

Комплексный анализ динамического отклика здания (определения частот, форм собственных колебаний, модальных декрементов затухания) на микросейсмические воздействия, вызываемые ветровой нагрузкой, работой технологического оборудования и другими факторами выполняется с помощью 17-и низкочастотных трех- и двухкомпонентных форс-балансных акселерометров «Geosig AC-72(73)», смонтированных по всей высоте Башни. Система предоставляет информацию о колебаниях Здания, которая необходима для интегральной оценки изменений технического состояния конструкций с течением времени и калибровки параметров расчетной модели;

Мониторинг планово-высотных перемещений верхней точки здания в режиме реального времени и с постобработкой производится с помощью системы спутникового

геодезического мониторинга. Антенна GNSS-приёмника «Novatel ProPak6» в наблюдаемой точке закреплена на навершии шпиля. Неподвижная точка, относительно которой производится измерение перемещений, закреплена на глубинном репере, смонтированном на расстоянии около 500 метров от Башни. Связь с приёмниками производится с помощью волоконно-оптической линии. Спутниковый мониторинг перемещений верхней точки в совокупности с результатами мониторинга кренов и колебаний предоставляет исчерпывающую информацию о деформации оси здания;

Установка двух метеостанций (вторая смонтирована на кровле МФЗ и осуществляет измерение климатических параметров в приземной зоне) позволит производить корреляционный анализ параметров НДС и отделять изменения параметров, связанных с деградацией строительных конструкций, от изменений сезонных и климатических.

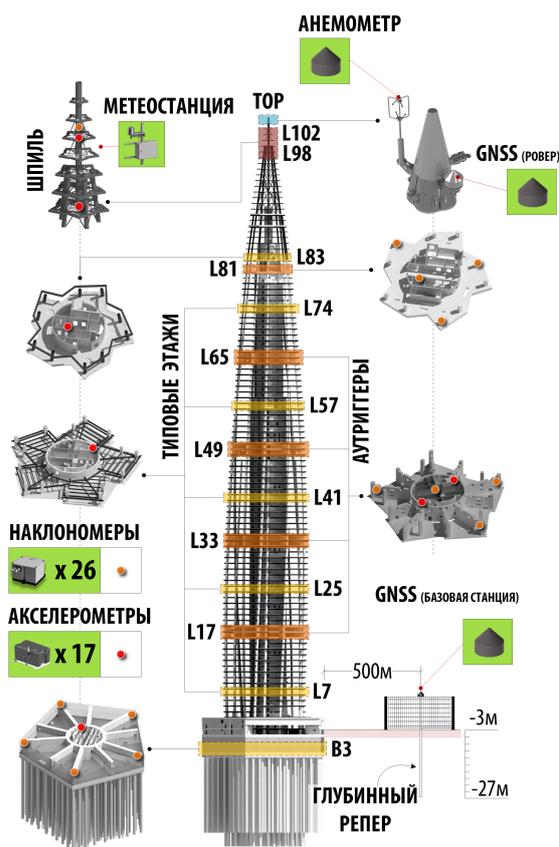


Рис. 5: Состав системы мониторинга надземной части Башни.

Введение перечисленных измерительных систем в эксплуатацию предполагается на завершающих этапах строительства.

Система мониторинга деформации коробчатого фундамента

Система мониторинга деформации КФ (рис. 7) – наиболее масштабная и сложная подсистема в составе СМДС, – была спроектирована для анализа изменений НДС фундамента, который в 2015 году попал в Книгу рекордов Гиннеса, как самая массивная конструкция из железобетона, отлитая непрерывным способом.

Для комплексного анализа напряженно-деформированного состояния на стержни рабочей арматуры нижней плиты, стен-диафрагм и верхней плиты было установлено в общей сложности 1210 струнных тензометров, объединенных в 196 створов (рис. 6).

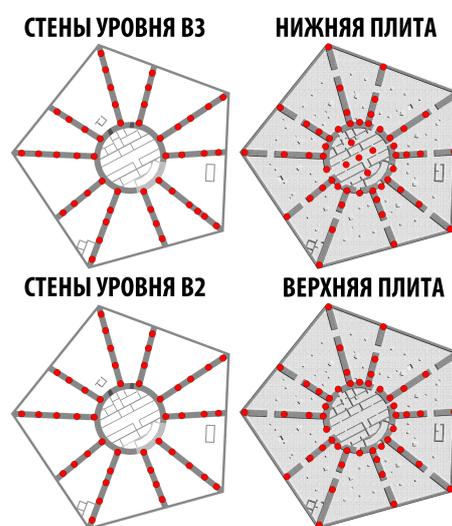


Рис. 6: Расположение створов с датчиками деформации в конструкциях КФ

Каждый створ, в зависимости от типа конструкции и характера её деформирования, включает в себя 2 или 3 измерительных пункта. Измерительные пункты оборудованы парой датчиков, ориентированных во взаимно перпендикулярных направлениях вдоль рабочих арматурных стержней. Такая конфигурация системы позволила с достаточной для сравнения с результатами расчета точностью определить распределение напряжений по толщине плит и стен КФ.

Система геотехнического мониторинга

Программа геотехнического мониторинга была разработана сотрудниками ООО «НИПП «СПЕЦГЕОПРОЕКТ» при научнотехническом сопровождении НИИОСП им. Герсеева в 2013 году. Проектом было предусмотрено проведение мониторинга ограждающих конструкций (стены-в-грунте),

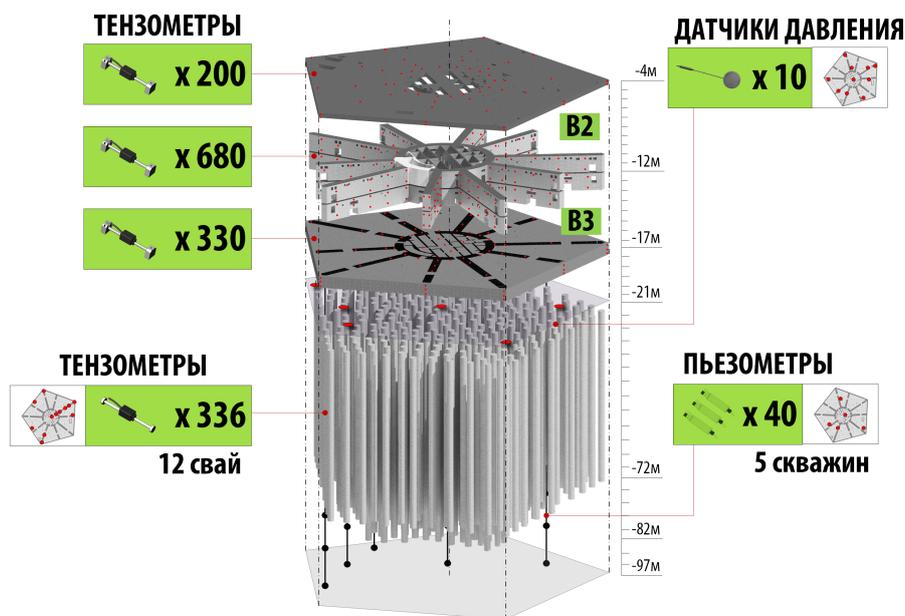


Рис. 7: Системы геотехнического мониторинга и мониторинга деформаций КФ

несущих конструкций подземной части зданий Башни, МФЗ и стилобатной части, а также окружающего массива грунта, включая наблюдения за режимом подземных вод. Монтаж измерительного оборудования для геотехнического мониторинга несущих конструкций Башни производился в 2013-2014 годах (рис. 7).

Мониторинг усилий в свайном основании осуществляется для контроля действительного характера распределения нагрузки на свайное поле. Для этой цели 12 из 264 свай были оборудованы закладными датчиками деформации струнного типа «Geokon 4200», установленными в семи уровнях. Полученная информация позволяет в ходе НТС осуществлять корректировку параметров расчетных моделей грунта и фундаментных конструкций для точного прогнозирования осадок сооружения. Результаты прогноза позволяют своевременно организовать компенсирующие мероприятия для предотвращения неравномерных осадок и их последствий.

Одной из составляющих геотехнического мониторинга, позволяющей уточнить распределение нагрузки между нижней плитой и сваями, что необходимо для комплексной оценки напряженно-деформированного состояния всей системы, является измерение контактного давления. Для этой цели под бетонной подготовкой нижней плиты КФ разместили 10 датчиков давления «Sisgeo L143» (с измерительным диапазоном до 5 МПа).

Как указывалось ранее, длительные реологические процессы в грунтах основания приведут к развитию осадок в процессе эксплуатации сооружения. Для оценки динамики осадок

основание оборудовали пятью скважинами с восемью пьезометрами струнного типа «Sisgeo PK45M» (с измерительным диапазоном 700-1000 кПа), позволяющими производить мониторинг порового давления воды в грунте. Пьезометры устанавливались методом полной цементации [1] скважин раствором на основе портландцемента и бентонита со средним шагом по глубине 10 метров.

Для оценки корректности подходов, принятых при проектировании уникальных фундаментов Башни, на объекте осуществляется мониторинг вертикальных перемещений массива грунта основания с помощью устройства пяти скважин средней глубиной 95 метров, оборудованных магнитными экстензометрами «Sisgeo D111» с 19 кольцевыми марками и зондом для снятия показаний. Данное оборудование не было включено в состав автоматизированной системы, измерения осуществляются вручную на периодической основе.

Проектные решения по организации автоматизированного мониторинга деформаций

Разработка архитектуры автоматизированной системы, проектной и рабочей документации и подбор оборудования были выполнены сотрудниками «СОДИС ЛАБ». Длительный срок эксплуатации системы (не менее 10 лет после окончания строительства) накладывает много ограничений на выбор датчиков. Фактически, стандартом для долговременного мониторинга медленно меняющихся деформаций в строительных конструкци-

ях являются струнные тензометры – это простые и надежные инструменты, которые было решено использовать и в рассматриваемом проекте. Будучи правильно установленными, струнные тензодатчики сохраняют работоспособность на протяжении десятилетий [2, 3], демонстрируя отличную стабильность нуля [4]. Преимуществом струнной технологии над более распространенными резистивными или полупроводниковыми датчиками является сам тип сигнала – частота собственных колебаний струны (а не напряжение, ток или сопротивление). Этот сигнал легко без искажений передать на большие расстояния, он не подвержен влиянию коррозии или попадания влаги на проводники кабельных линий, слабо чувствителен к наличию электромагнитных помех и не зависит от длины кабелей.

Основная трудность, возникающая при монтаже струнных тензометров в тело железобетонных конструкций – это обеспечение физической сохранности приборов, сигнальных кабелей и их маркировки во время устройства арматурного каркаса и бетонирования вплоть до демонтажа опалубки.

Наиболее сложными технологически оказались операции по монтажу тензометров в конструкции коробчатого фундамента из-за их густого армирования (рис. 8). Уста-



Рис. 8: Укладка кабелей тензодатчиков в закладные детали

новка датчиков осуществлялась на сетках рабочей арматуры с помощью приварки концевых блоков к арматурным стержням (рис. 9). Прокладка кабеля через горизонтальные конструкции выполнялась в раструбных ПВХ-трубах, которые наращивались по мере устройства арматурного каркаса (рис. 10). Вывод кабелей из тела бетона осуществлялся исключительно на вертикальных конструкциях, во время бетонирования которых кабели сохранялись внутри специально подготовленных закладных деталей из ПВХ-изделий. После демонтажа опалубки закладные детали вскрывались, и кабели выводились

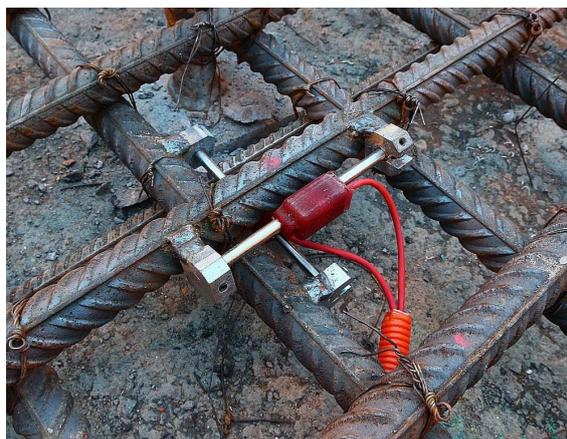


Рис. 9: Тензометры, смонтированные на арматуре нижней плиты коробчатого фундамента



Рис. 10: Мероприятия по выводу кабелей из тела нижней плиты коробчатого фундамента

лись наружу (рис. 11), где подключались к системе регистрации данных.



Рис. 11: Закладная деталь с кабелями тензометров, вскрытая после демонтажа опалубки стены КФ

Одной из основных задач по организации автоматизированной системы мониторинга деформаций являлась необходимость её запуска на ранних стадиях строительства, что наложило ряд существенных ограничений на

всю архитектуру системы. Было принято решение по развертыванию распределенной системы сбора данных, в противовес централизованной. Оборудование для автоматической регистрации размещали на технических этажах Башни (B3, B2, L18, L34, L50, L66, L81) по мере возведения несущих конструкций (рис. 12), образуя семь автономных подсистем, к которым подключили нижерасположенные датчики.



Рис. 12: Размещение щитов сбора данных в коробчатом фундаменте

Хронологически, развертывание системы мониторинга деформаций разделилось на шесть этапов (рис. 13) - на первом этапе запустили в эксплуатацию систему мониторинга деформаций коробчатого фундамента и оборудование системы геотехнического мониторинга, далее последовательно подключались типовые и аутриггерные этажи.

Все узлы сбора данных подключили к временной системе электропитания, обеспечив им батарейную поддержку на случай непродолжительных перебоев в электроснабжении. Связь между узлами обеспечили с помощью временной проводной сети передачи данных.

Несмотря на большие расстояния между узлами, от применения волоконнооптических линий связи отказались из-за сложности их ремонта в построечных условиях, остановившись на использовании «медных» технологий DSL и Ethernet.

Для уменьшения возможности потери данных их регистрацию было решено осуществлять на локальных контроллерах с внутренней памятью и широкими возможностями по программированию логики (даталоггерах), что определило принципиальную архитектуру системы, изображенную на рис. 14.

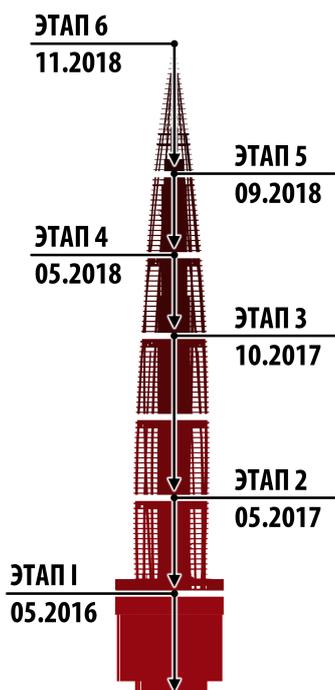


Рис. 13: Стадийность запуска автоматизированной системы мониторинга деформаций

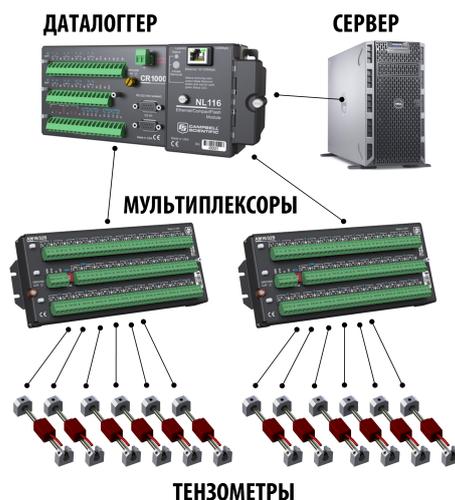


Рис. 14: Принципиальная архитектура автоматической системы сбора данных

Все узлы сбора данных были построены с использованием оборудования компании «Campbell Scientific» (рис. 15).

Для мониторинга конструкций КФ оборудовали два узла сбора данных на уровнях B3 и B2. Мультиплексорное оборудование установили непосредственно над закладными деталями в каждой точке выхода сигнальных кабелей из тела конструкций (рис. 16).

Такое решение позволило значительно сократить протяженность кабельных линий, уменьшить вероятность повреждения кабелей в процессе строительства, упростить и удеше-



Рис. 15: Шкаф с даталоггерами системы сбора данных с датчиков КФ

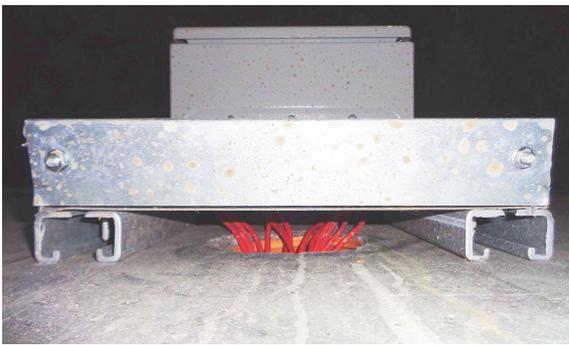


Рис. 16: Шкаф с мультиплексорами, установленный над закладной деталью на стене КФ

вить ремонт, позволило оперативно изменять трассировку кабелей и избавило от необходимости наращивать сигнальные кабели тензодатчиков.

Прокладка кабелей производилась в лотках (рис. 17), что свело случаи повреждения линий при строительных работах к единичным.



Рис. 17: Магистральные кабели от мультиплексоров к даталоггерам

На аутриггерных этажах оказалось целесообразнее установить мультиплексоры в непосредственной близости от даталоггеров в общих шкафах сбора данных. Это привело

к необходимости устройства дополнительных коммутационных узлов для соединения магистральных кабелей с тензодатчиками, но уменьшило общее количество необходимого оборудования.

Универсальность струнного интерфейса позволила легко интегрировать оборудование для геотехнических задач в состав системы мониторинга деформаций.

Доставка данных мониторинга в штаб строительства, где смонтировали временный диспетчерский пункт мониторинга (рис. 19), после завершения первого этапа пусконаладочных работ была организована с помощью беспроводного Wi-Fi моста.

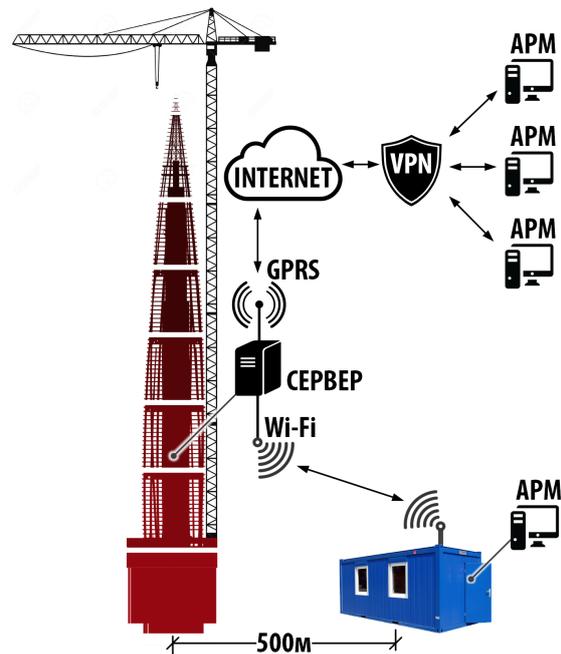


Рис. 18: Схема передачи данных мониторинга

Установка GPRS-модема обеспечила удаленную связь с сетью мониторинга через Интернет с помощью защищенного VPN-тоннеля (рис. 18). Это решение позволило оперативно предоставлять информацию, проводить техническое обслуживание и анализировать результаты мониторинга в режиме online.

Программное обеспечение системы мониторинга

Внедрение масштабной системы мониторинга, включающей в себя более 2800 датчиков, потребовало развертывания и поддержки современной ИТ-инфраструктуры. В качестве программной платформы для работы с данными мониторинга было использовано окружение SODIS Building M4 (рис. 20), в состав которого входит большое число проблемно-ориентированных сервисов и инструментов

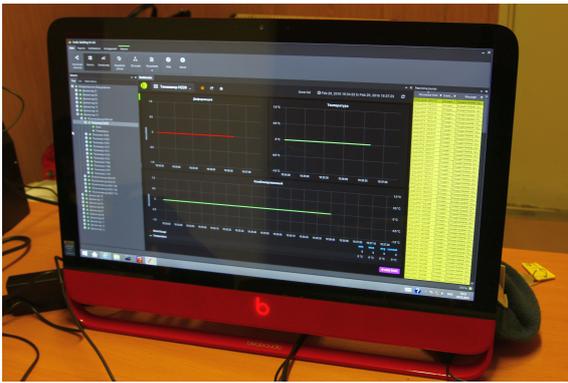


Рис. 19: Временный диспетчерский пункт в штабе Генподрядчика

для решения задач долговременного мониторинга строительных конструкций.

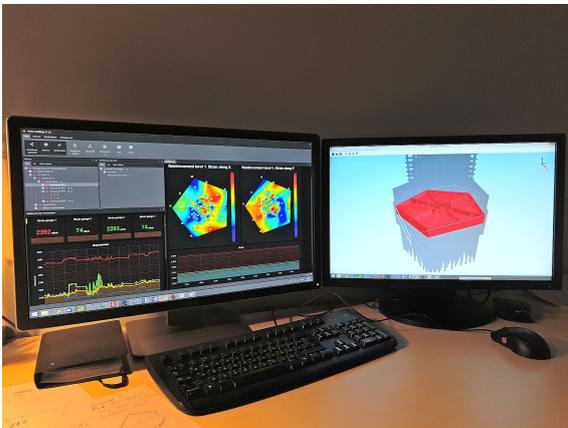


Рис. 20: Интерфейс ПК SODIS Building M

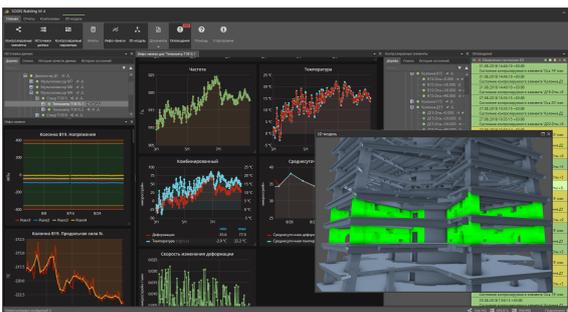


Рис. 21: Интерфейс ПК SODIS Building M

Возможности программной платформы SODIS Building M (рис. 21) позволили обеспечить автоматизированный учет индивидуальных характеристик датчиков (калибровочные коэффициенты, данные начальных замеров), метаинформации (координаты мест установки, ориентация датчика, тип конструкции, деформационные характеристики материалов, геометрические характеристики сечений, принадлежность к измерительным створам и т.п.), необходимой для анализа данных, что позволило автоматическим способом перейти

от непосредственных результатов измерений (деформации) к напряжениям и внутренним усилиям в элементах конструкций, для которых возможно произвести сравнение с расчетными величинами по результатам математического моделирования. Интерфейс разработки приложений (API) позволил автоматизировать обмен данными с ВМ и КЭ-моделями Башни.

Большой объем пуско-наладочных работ вызвал необходимость разработки инструментов для автоматической генерации кода микропрограмм локальных контроллеров, программ-парсеров конфигурационных таблиц и монтажных протоколов. К завершению работ по наладке первого пускового этапа были автоматизированы 95% рабочих операций по настройке системы, что позволило исключить неизбежные ошибки исполнителей, вызванные выполнением рутинных операций, а также увеличить скорость наладки последующих блоков системы.

Объем полученных данных мониторинга

По данным на конец августа 2018 года в базе данных системы мониторинга Башни «Лахта Центра» находится почти 74 млн измерений, полученных от 2346 датчиков деформации, 9 датчиков давления и 39 пьезометров. Вся собранная информация была тщательным образом отфильтрована, отчищена от случайных выбросов и нефизичных значений, дополнена результатами ручного мониторинга (рис. 22).

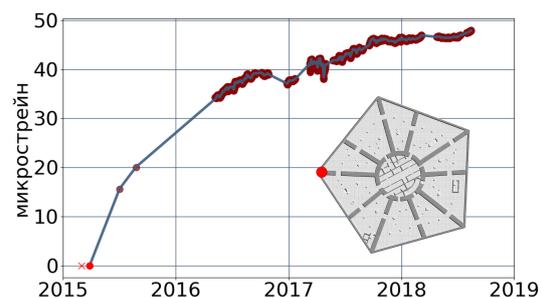


Рис. 22: Показания датчика деформации X10 в нижней плите КФ

Полученные данные легли в основу расчетов компонент напряженно-деформированного состояния элементов конструкций Башни (рис. 23, 24).

Информация, полученная от геотехнического оборудования (датчиков давления и пьезометров), используется для уточнения жесткостных и консолидационных характеристик расчетной модели основания (рис. 25).

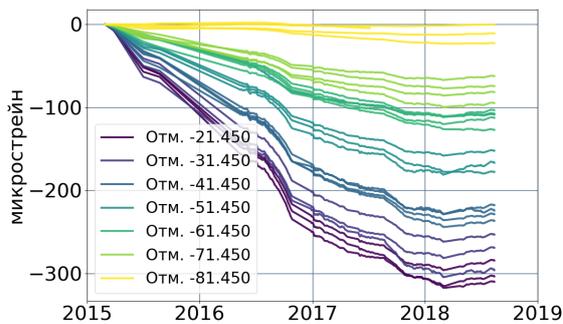


Рис. 23: Показания датчиков деформации в свае №4

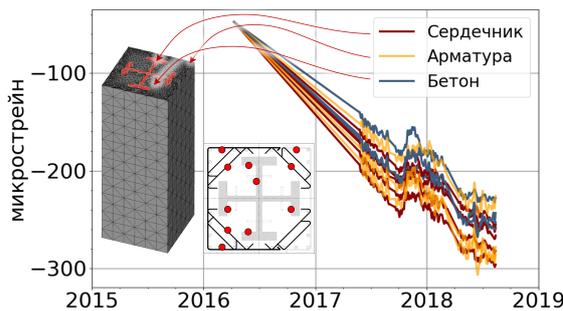


Рис. 24: Показания датчиков деформации в колонне №2 на уровне L14



Рис. 25: Показания датчика порового давления (пьезометра) в скважине №5

Анализ результатов мониторинга

Сопоставление данных мониторинга деформации с результатами конечно-элементного (КЭ) моделирования конструкций Башни – базовая задача НТС, решение которой позволяет приблизиться к определению действительного характера работы конструкций и определить слабые места в расчетной модели, оперативно отреагировать на опасные изменения НДС и не допустить развития аварийной ситуации. Для анализа результатов были взяты данные мониторинга по состоянию на 1 июля 2018 года. По нашим расчетам на рассматриваемую дату несущие конструкции здания испытывали 100% постоянных нагрузок, 100% временных нагрузок на тех. этажи, 100% нагрузок от фасадных конструкций и

50% нагрузок от полов перегородок и коммуникаций. Основные результаты сопоставления в максимально лаконичном виде изложены в рамках настоящей статьи.

В качестве одного из параметров, по которым выполнялось сравнение, выступили вертикальные усилия в композитных колоннах и стенах ядра в уровнях L2, L5, L8 и L14.

Расчет усилий провели в трех вариантах:

1. на действие временных нагрузок на техэтажах, собственный вес конструкций и фасадов и 50% веса полов, перегородок и коммуникаций;
2. на те же самые нагрузки, что и в предыдущем варианте, но с учетом последовательности возведения;
3. на те же самые нагрузки, с учетом последовательности возведения и на абсолютно жестком основании.

Результаты расчета для уровня L2 приведены на рис. 26. Расхождение расчетных усилий, воспринимаемых отдельными композитными колоннами и ядром, с данными мониторинга находится в диапазоне 3 – 33%. Однако, суммарная расчетная нагрузка, приходящаяся на наблюдаемые конструкции в уровне L2, отличается от измеренной менее чем на 2%. Такие результаты, по-видимому, указывают на то, что приложенная в расчетной модели нагрузка, по своему распределению отличается от реальной.

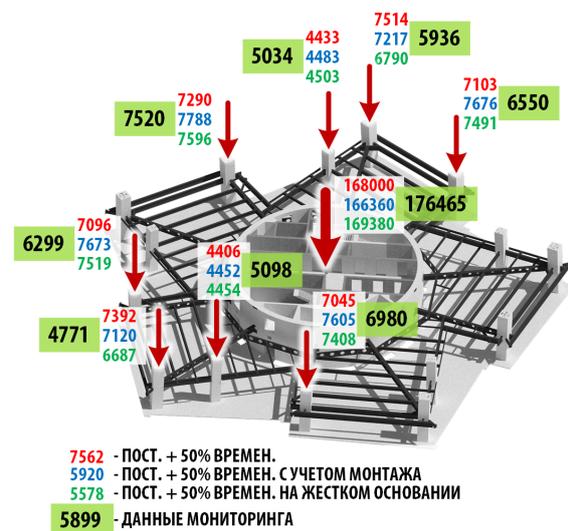


Рис. 26: Уровень L2. Нагрузки на конструкции, т.с. Сравнение с результатами мониторинга

Хорошее совпадение результатов мониторинга достигнуто и в уровне L5, где расчетная нагрузка, приходящаяся на ядро, отличается от измеряемой на 2.5% К сожалению,

неудовлетворительные результаты по нагрузке в ядре зафиксированы в уровне L8 (расхождение 46%, возможные причины см. ниже).

В уровне L14 данные мониторинга указывают на существенную разницу в распределении нагрузки между колоннами и ядром по сравнению с результатами расчета. Различие суммарной нагрузки на каркас составляет менее 7%, однако на ядро, по данным мониторинга, приходится на 20% больше вертикального усилия, чем получено по данным моделирования. Предположительно, это объясняется включением в работу аутриггерных ферм, что подтверждается различием в наблюдаемых усилиях только в колоннах, расположенных под осями аутриггеров. Авторы надеются поставить точку в интерпретации данной проблемы после обработки всех данных по деформации каркаса выше рассматриваемого уровня.

Серьезным препятствием для расчета напряжений и усилий в железобетонных конструкциях по показаниям датчиков деформации является необходимость учета ползучести материала, что приводит к необходимости понижать в расчетах модуль деформации.

Для предварительной оценки влияния ползучести на результаты измерений можно воспользоваться методикой, описанной в [5], где используются соотношения, разработанные Американским Институтом Бетона (ACI). Более точные результаты можно получить по результатам натурных испытаний.

Учет влияния ползучести на деформирование сталежелезобетонных колонн был проведен, основываясь на результатах испытаний [6], которые показали, что стальной сердечник должен в среднем воспринимать не менее 60% от общей нагрузки.

Анализ результатов мониторинга нижней плиты КФ показал, что деформация плиты в уровне двух нижних сеток армирования на значительной площади плиты находится в диапазоне 300-500 микрострейн, что превышает предельную допустимую для бетона деформацию растяжения при длительном действии нагрузки согласно [7] (270-360 микрострейн). Поэтому для расчета усилий применялся пониженный модуль деформации для нижней плиты, соответствующий используемому в КЭ-модели.

Проектные решения по размещению датчиков деформации в композитных колоннах можно считать удачными – получены качественные данные, хорошо коррелирующие между собой, и позволяющие произвести расчет интегральных сжимающих усилий. Необходимо отметить, что в колоннах наиболее нагруженного наблюдаемого уровня L2 деформации гибкой арматуры составляют в сред-

нем 92%, а деформации бетона – 96% от деформации сердечника, что подтверждает допустимость принятия гипотезы об их совместности. Стальные сердечники наблюдаемых колонн в этом уровне воспринимают 42-60% от общей вертикальной нагрузки.

Для колонн уровня L14 соотношение между деформациями выглядит иначе: 76% от деформации сердечника составляют деформации гибкой арматуры, 73% – деформации бетона. Выводы о причинах повышенной деформации сердечника, которые в этом уровне воспринимают 45-73% общей нагрузки, будут сделаны после обработки данных мониторинга колонн по всем наблюдаемым уровням в одной из следующих статей.

Результат мониторинга деформации стен ядра оказался менее очевидным. На некоторых из наблюдаемых этажей (в частности на уровне L8) выбор только пяти измерительных пунктов оказался достаточным для определения локальных действующих напряжений в материале, но не позволяющим произвести точный расчет нагрузки, воспринимаемой ядром. Анализ расчетного распределения напряжений в стенах ядра на таких этажах показал наличие большого количества концентраций, делающих поле напряжений весьма неоднородным. Поэтому мы считаем, что осреднение по пяти точкам может приводить к существенной ошибке в расчете усилия, воспринимаемого ядром.

В результате проведения мониторинга деформации свайного поля были получены диаграммы деформирования стволов свай в процессе возведения Башни (рис. 27), на основании которых была рассчитана нагрузка, приходящаяся на голову каждой наблюдаемой сваи (рис. 28, расположение свай в плане см. на рис. 3).

Анализ полученных данных показал, что наибольшую нагрузку (до 3252 тс) воспринимают сваи, расположенные в центральной части фундамента. Минимальная нагрузка при этом наблюдается на угловых сваях (938 тс). Отношение усилия в центральной свае к усилиям в крайних сваях – находится в диапазоне 2.9–3.4, что не соответствует общим представлениям о работе свай в свайном поле. Такие результаты возможно являются следствием наличия более жесткого основания. Однако, вопрос представляется куда более сложным. Для его рассмотрения необходимо проведение глубокого анализа результатов инженерно-геологических изысканий, испытания грунта сваями, анализа результатов измерений датчиков порового давления, послойных деформаций грунта и напряжений под подошвой ростверка, что выходит за рамки данной статьи и будет рассмотрено в отдельной статье, посвященной геотехническо-

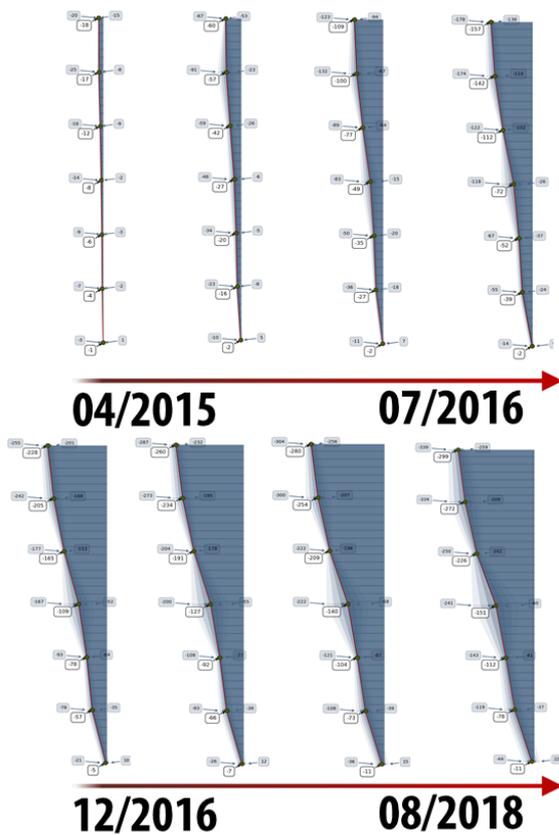


Рис. 27: Эпюра распределения нагрузки вдоль ствола сваи №4

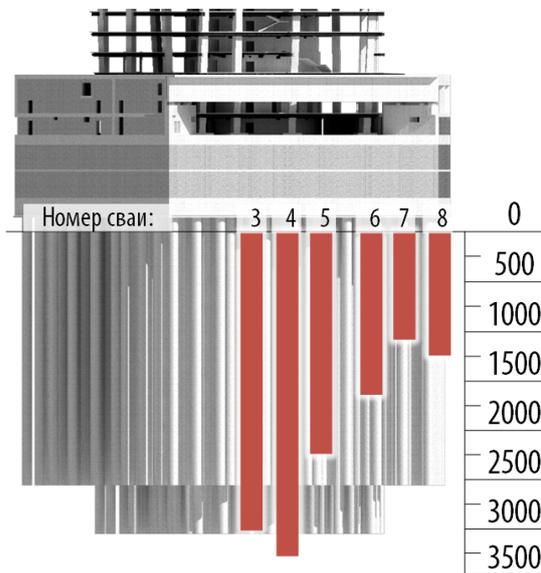


Рис. 28: Результаты мониторинга. Распределение усилий в сваях в радиальном направлении на 01.08.2018, тс

му анализу проекта, расчета и данных мониторинга.

По результатам периодически выполняемых геодезических измерений средняя осадка фундамента Башни на 01.08.2018 года равна

60 мм, что практически совпадает с результатами расчета средней стабилизированной осадки на ту же дату, составляющей 64 мм (рис. 29).

Средняя конечная величина осадки сооружения по прогнозу должна увеличиться на 34% и достигнуть 97 мм. Усилия в сваях после затухания всех реологических процессов составят 1290...5200 тс.

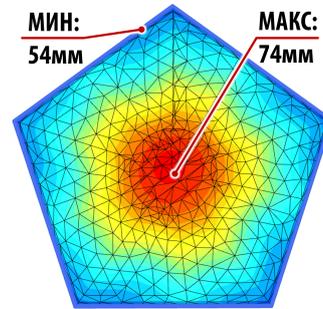


Рис. 29: Расчетная величина осадки фундамента на 01.08.2018

Отличие измеряемой осадки от расчетной конечной является следствием неполного приложения нагрузки и незавершившегося процесса деформации основания.

Проектные решения по размещению датчиков деформации в плитах коробчатого фундамента позволили в процессе возведения очень подробно контролировать и изучать напряженно-деформированное состояние этих крайне ответственных элементов конструкций Башни (рис. 32). По результатам измерения деформации были определены напряжения и усилия в трех наиболее нагруженных арматурных сетках нижней плиты и двух – верхней плиты, напряжения в теле бетона. Путем интегрирования по высоте сечения эпюры нормальных напряжений были вычислены действующие в плитах изгибающие и мембранные усилия, которые сравнили с результатами конечно-элементного моделирования.

Результаты мониторинга нижней плиты КФ, приведенные на рис. 30, показали, что расчетная жесткость основания отличается от реальной (это косвенно подтверждается распределением нагрузки на сваи, показанным на рис. 28), что приводит к различиям в характере распределения усилий по площади плиты. В то же время амплитудные значения усилий различаются от расчетных незначительно.

Проектные решения по мониторингу деформации нижней плиты КФ позволили определить реальные напряжения в рабочей арматуре, в частности, в наиболее нагруженной нижней арматурной сетке растягивающие напряжения не превышают 80 МПа

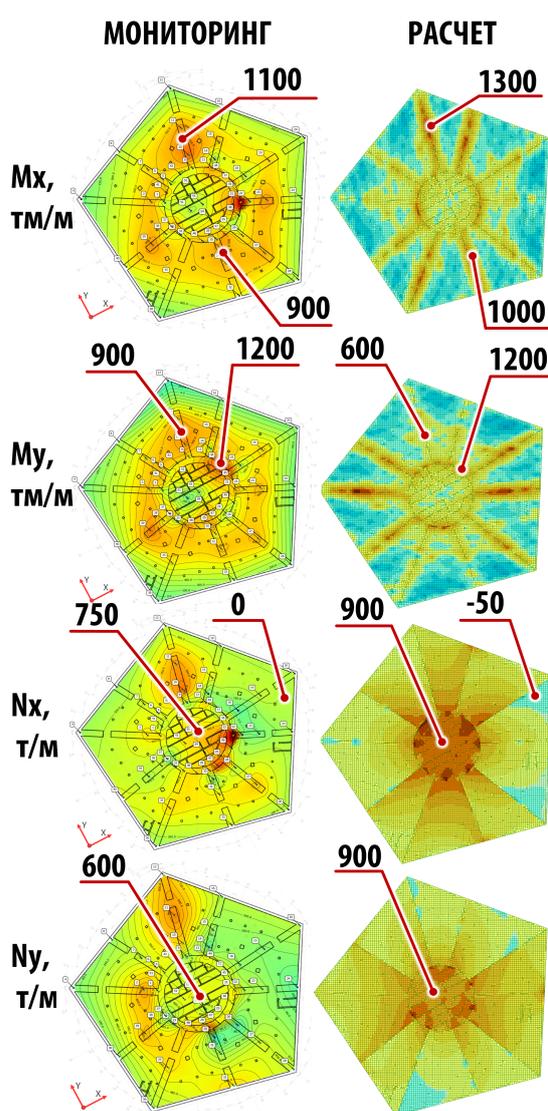


Рис. 30: Изополю внутренних усилий в нижней плите КФ. Сравнение с результатами расчета

(рис. 31), за исключением небольшого числа локальных концентраций.

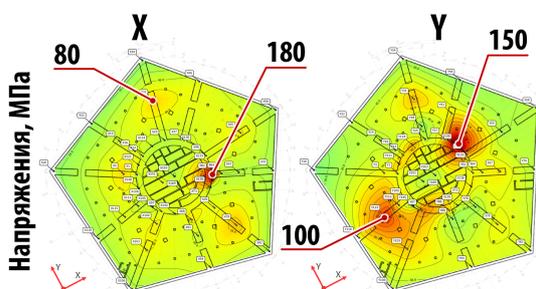


Рис. 31: Результаты мониторинга. Изополю напряжений в нижней арматурной сетке нижней плиты КФ

В целом, система мониторинга охватывает весь комплекс основных несущих конструкций, обеспечивая возможность наблюдения

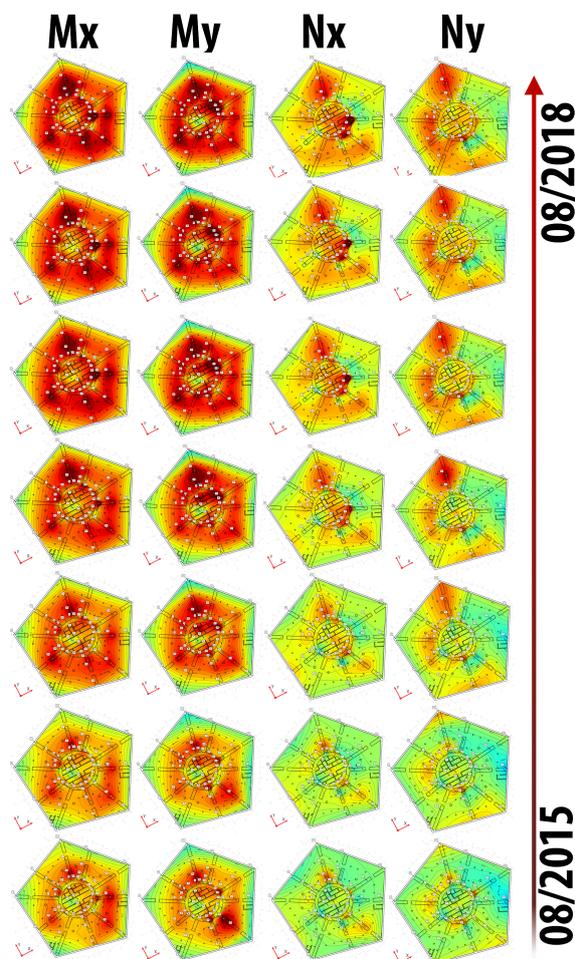


Рис. 32: Результаты мониторинга. Изополю внутренних усилий в нижней плите КФ

за действительными значениями параметров НДС в процессе строительства и будущей эксплуатации. Неудовлетворительные в ряде случаев совпадения результатов расчета с данными мониторинга иллюстрируют необходимость в ходе проведения НТС вносить корректировки в расчетную модель по результатам обработки данных мониторинга.

Заключение

Автоматизированная система мониторинга напряженно-деформированного состояния несущих конструкций Башни МФК «Лахта Центр» – редкий пример успешного с инженерной точки зрения внедрения подобных систем, который позволил решить ряд задач по проведению научно-технического сопровождения строительства уникального объекта: уточнить нагрузки и деформационные характеристики материалов, установить реальную жесткость основания, рассчитать действующие внутренние усилия в элементах конструкций и, тем самым, подтвердить надежность и безопасность возведенного сооружения.

Обработка данных о деформации свайного основания, коробчатого фундамента, композитных колонн и центрального ядра выявила ряд неожиданных эффектов, возникновение которых не было учтено при проектировании здания: раннее включение в работу аутриггерных ферм, неравномерное распределение нагрузки на свайное поле.

Сравнение результатов мониторинга деформаций с расчетами показало хорошее совпадение интегральных характеристик НДС большей части конструкций. Но при детальном рассмотрении, для некоторых конструкций обнаружилось существенные различия между ожидаемыми и наблюдаемыми напряжениями и усилиями, указывающие на недостаточную точность моделирования работы указанных элементов под нагрузкой. При этом сложно представить, что подобные явления могут быть выявлены с помощью какого-либо другого источника информации, помимо системы мониторинга. Таким образом, для качественного решения задач НТС расчетная модель должна быть предварительно уточнена и адаптирована, а мониторинг в процессе адаптации должен являться обязательным мероприятием.

При этом система мониторинга не должна проектироваться номинально, как это часто распространено в практике отечественного строительства. Проект системы должен строго опираться на положения программы мониторинга, в которой в обязательном порядке должны быть определены контролируемые элементы конструкций, их контролируемые параметры, и сформулирована методология использования полученных значений контролируемых параметров для калибровки расчетных моделей основания, фундаментов и надземных частей сооружения.

Авторы полагают необходимым проводить более интенсивную работу по разработке методологии калибровки КЭ-моделей сооружений на основании данных объективного инструментального контроля, предоставляемыми автоматизированными системами мониторинга.

Внедренная система является самой комплексной системой мониторинга в истории гражданского строительства в нашей стране, сравнимой по своим масштабам с ведущими мировыми аналогами [8]. При этом по нашим оценкам общие затраты на систему не превысили [вставить цифру]% от общей стоимости возведения МФК. СМДС, отдельные части которой эксплуатируются на протяжении более 4 лет, показала отличную выживаемость и ремонтпригодность в тяжелых и агрессивных построечных условиях. В процессе строительства Башни накоплен огромный массив данных. Часть этой информации еще толь-

ко предстоит подвергнуть глубокому анализу компетентными специалистами. Наиболее интересные проблемы интерпретации результатов мониторинга и решения задач НТС с их помощью будут освещены в рамках отдельных статей.

Башню Лахта-Центра можно уверенно назвать зданием будущего, оборудованным по последнему слову строительной науки и техники. Выражаем уверенность в том, что СМДС органично займет свое место среди «традиционных» инженерных систем, значительно увеличив безопасность людей и повысив долговременную надежность при эксплуатации сооружения.

Благодарности

Авторы выражают признательность:

- службам Главного инженера компании АО «МФК «Лахта центр» за ответственный подход к обеспечению безопасности возведения и эксплуатации уникальных зданий Комплекса, без усилий которых реализация столь масштабного проекта полноценной системы автоматизированного мониторинга была бы невозможной;
- компании ЗАО «ГОРПРОЕКТ» за возможность использования при подготовке иллюстративного материала фрагментов BIM-модели МФК, разработанной её специалистами;
- персонально сотрудникам компании «Ренессанс Констракшн» Максиму Войнову и Андрею Рафаилову за грамотное управление всеми производственными процессами при монтаже оборудования системы мониторинга;
- персонально сотруднику компании SAMSUNG C&T Ренату Нурмухаметову за эффективную работу по координации проектирования системы мониторинга.

Список литературы

- [1] Contreras I.A., Grosser A.T., VerStrate R.H. The Use of the Fully-grouted Method for Piezometer Installation // Proceedings of the 7th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics. FMGM. Boston, MA: 2007.
- [2] McRae J.B., Simmonds T. Long-term stability of vibrating wire instruments. One manufacturer's perspective // Proceedings of the 3th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics. FMGM. Oslo, Norway: 1991. С. 283–293.

- [3] DiBiagio E. A Case study of Vibrating-Wire Sensors That Have Vibrated Continuously For 27 Years // Proceedings of the 6th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics. Oslo, Norway: 2003.
- [4] Sørum G., Dyken T. Vibrating-wire reinforcement strain gauges for performance monitoring of large concrete structures // IABSE reports. Norway, 1987.
- [5] Hayes J., Simmonds T. Interpreting Strain Gage Measurements from Load Tests in Bored Piles // Proceedings of the 9th International Conference on Piling and Deep Foundations. Nice, France: 2002. с. 663–669.
- [6] Экспериментальные исследования стале-железобетонных конструкций, работающих на внецентренное сжатие / В.И. Травуш, Д.В. Конин, Л.С. Рожко [и др.] // Academia. Архитектура и строительство. М., 2016. № 3. с. 127–135.
- [7] СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. М. 2013. Введ. 2013-01-01.
- [8] Abdelrazaq A. Validating the structural behavior and response of Burj Khalifa: synopsis of the full-scale structural health monitoring programs // International Journal of High-Rise Buildings. 2012. Т. 1, № 1.