

Здание мэрии Москвы

Этапы проектирования и строительства. Часть 1. Проект

Строящееся на участке № 15 ММДЦ «Москва-Сити» высотное здание мэрии Москвы уникально. И хотя оно будет не самым высоким в Сити – всего 72 этажа (верхняя отметка здания – 308,4 м), а по общей площади 636 000 м², аналогов этому зданию нет не только в Москве, но и среди высотных зданий мира. Впервые в нашей стране в большом объеме в вертикальных несущих конструкциях здания применен товарный бетон сверхвысокого класса В90 по прочности.

Текст ВЛАДИМИР ТРАВУШ, д-р техн. наук, ЗАО «ЭНПИ»; АЛЕКСЕЙ ШАХВОРОСТОВ, канд. техн. наук, ЗАО «Курортпроект»; ДМИТРИЙ ЗЕЛЕНОВ, ООО «Инфорспроект»

Авторы статьи – разработчики конструктивного раздела проекта, поэтому информация о здании дается с точки зрения инженера-конструктора. В то же время мы постарались не забыть основные вехи проектирования и строительства здания. В этом номере мы расскажем об истории развития проекта, опишем строительные конструкции, а также приведем некоторые детали расчета несущих конструкций здания.

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ПРОЕКТА

Исходным пунктом для строительства здания является указ мэра Москвы от 08.02.2002 № 9-УМ «О создании комплекса административных зданий правительства Москвы и Московской городской думы в Московском международном деловом центре «Москва-Сити». Вскоре после выхода Указа был объявлен открытый международный конкурс на архитектурно-градостроительное решение, победителем которого стало ЗАО «Курортпроект». За

время своего существования проект здания претерпел некоторые изменения, причем первое (вторая редакция проекта) было значительным.

Первая редакция проекта (см. рис. 1) была выпущена в 2005 году. Надземная часть здания имела высоту 71 этаж (верхняя отметка здания – 308,4 м) и включала в себя четыре высотных блока по 60 этажей в каждом, объединенных 11-этажной венчающей частью и «развязанными» через каждые восемь этажей семью двухэтажными ярусами технических этажей. Подземная часть здания габаритами 117х94,9 м состояла из 5 этажей. Общая площадь здания составляла 479 600 м².

Основные несущие конструкции здания – четыре сталежелезобетонных ядра с толщиной стенки 1,2 м и размерами 15,6х15,6 м по наружному контуру, объединенных мощными фермами в уровнях технических этажей. Образованная таким образом пространственная рама обеспечивала общую устойчивость здания и восприятие всех действующих на него вертикальных и горизонтальных нагрузок. В габаритах технических этажей были предусмотрены консоли-кронштейны высотой 7,8 м и вылетом около 8,7 м, на которые опирались фасадные фермы пролетом 14,4 м. К этим фасадным фермам, а также к главным фермам технических этажей подвешивались на стальных подвесках балочные клетки перекрытий этажей здания.

В рамках прохождения госэкспертизы 16 декабря 2005 года проект был рассмотрен на заседании научно-технического совета Москомархитектуры. По результатам заседания НТС рекомендовано внести в проект корректировки, в частности отказаться от подвесок, к которым были «подвешены» межэтажные перекрытия. Данное решение было признано ненадежным с точки зрения обеспечения устойчивости здания к прогрессирующему обрушению.

Основанием для разработки второй редакции проекта (см. рис. 2) здания на участке № 15 стали замечания, уточнения, корректировки, полученные при неоднократном рассмотрении проекта. В комплексе выделили 50%-ную инвестиционную часть (первоначально планировалось строить полностью за счет бюджета Москвы). В результате при сохранении внешнего архитектурного облика здания произошли значительные изменения его объемно-планировочного решения. Увеличена общая площадь здания с 479 600 до 630 500 м² (из-за добавленной инвестиционной части) за счет уменьшения атриумов и создания центрального ядра, в котором были размещены лифтовые шахты, лестницы, коммуникационные каналы. Претерпели значительные изменения входные и вестибюльные группы. Для разделения потоков людей, направляющихся в правительственную и инвестиционную части здания, дополнительно появились 6-й подземный и 72-й надземный этажи. Отметка верха здания 308,4 м осталась без изменения. Значительно (с 52 900 до 150 000 м²) увеличился соседний 1-й участок комплекса, к которому был запроектирован надземный переход высотой в 11 этажей, где разместили залы заседаний.

Претерпевшее кардинальные изменения архитектурное решение здания потребовало значительной корректировки его несущих конструкций. В результате строение было разработано в полностью железобетонном каркасе. Четыре башни, соединенные в уровнях технических этажей мощными фермами, преобразовались в единое здание с одним центральным ядром и четырьмя «уголковыми» ядрами на месте центральных ядер бывших башен. Монолитные железобетонные стены и колонны здания имели изменяющиеся по высоте сечения. В подземной, наиболее нагруженной части толщина стен центрального ядра составляла от 500 до 800 мм, толщина стен «уголковых» ядер составляла 600 мм. Колонны имели сечения 2000х2000, 2250х1500, 1750х1500, 1500х1500 мм. В стенах и колоннах нижних этажей здания был предусмотрен бетон класса В90 по прочности.

В рамках прохождения госэкспертизы 6 апреля 2007 года проект был снова рассмотрен на заседании научно-технического совета Москомархитектуры. По разделу «Строительные конструкции» принципиальных замечаний на этот раз не возникло, проект был рекомендован к утверждению.

Третья редакция проекта (см. рис. 3) высотного здания мэрии Москвы на участке № 15 ММДЦ «Москва-Сити» выполнялась в 2007 году для повышения инвестиционной привлекательности объекта. Корректировка касалась в основном здания на участке № 1, где для размещения большего количества машино-мест общая площадь увеличилась с 150 000 до 170 000 м². В проекте здания на участке № 15 были сохранены все принципиальные планировочные и инженерные решения, внешние габариты и конструктивная схема, решения фасадов. Увеличение полезной площади здания произошло за счет изменения фасадной системы (отказ от системы «двойной фасад» с межвитражным пространством 500 мм), оптимизации внутренних границ атриумов.

В конструктивном разделе проекта балочные «кессонные» перекрытия в надземной части здания, запроектированные ранее, были заменены на безбалочные перекрытия с капителями. Было скорректировано расположение стен жесткости в уровнях технических этажей для более удобного размещения

Здание решено в монолитном железобетонном каркасе. Горизонтальные нагрузки, а также значительную часть вертикальных воспринимают центральное и четыре «уголковых» ядра жесткости



Владимир Травуш,
д-р техн. наук



Дмитрий Зеленев



Алексей Шахворостов,
канд. техн. наук



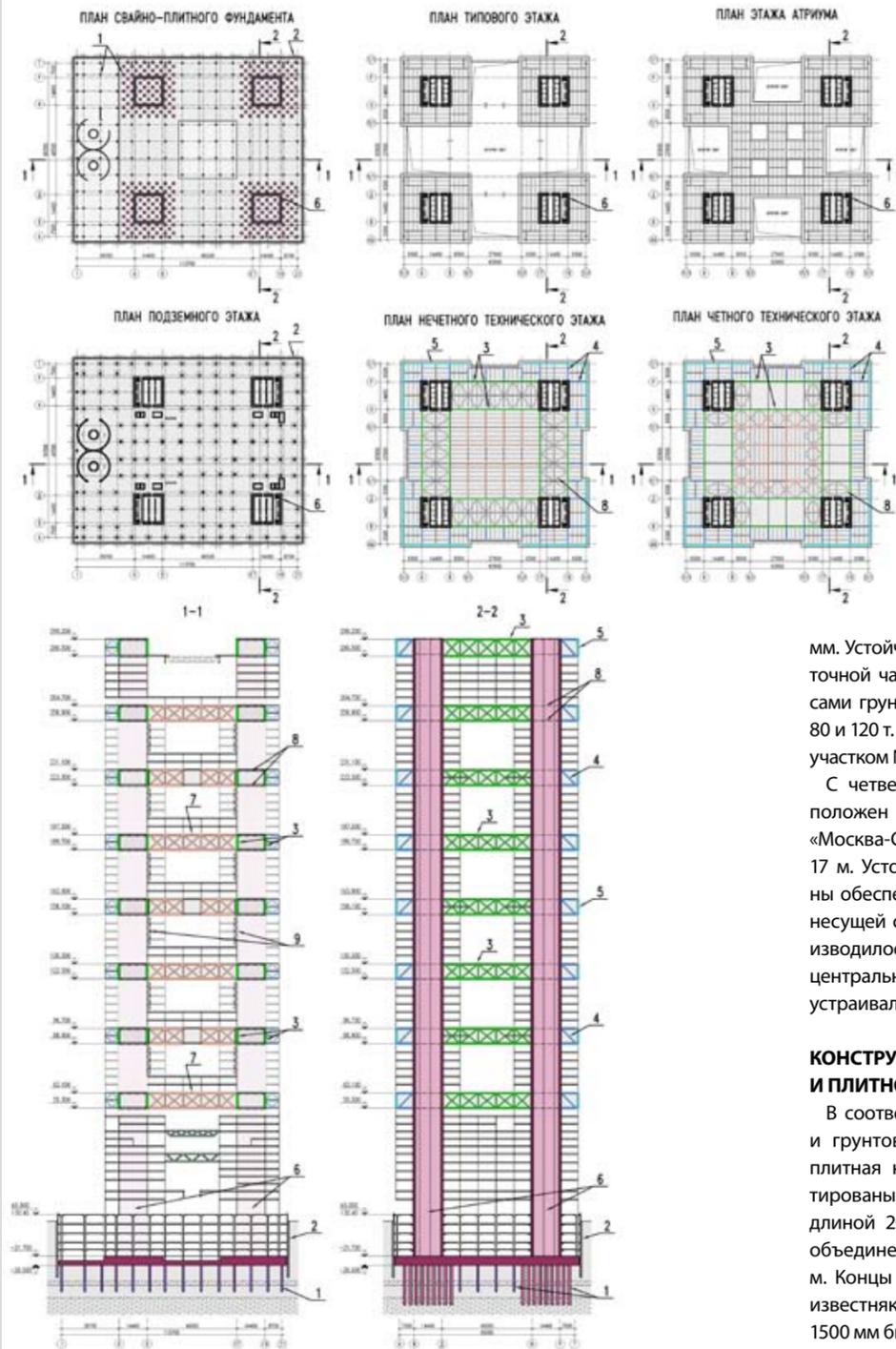


Рис. 1.
КОНСТРУКТИВНАЯ СХЕМА ЗДАНИЯ НА УЧАСТКЕ № 15 ММДЦ «МОСКВА-СИТИ» (1-Я РЕДАКЦИЯ ПРОЕКТА)
1 – буронабивные сваи Ø1500 и 900 мм
2 – стена в грунте
3 – главные фермы техэтажа
4 – кронштейны для подвески этажей
5 – фасадные фермы
6 – сталежелезобетонные ядра жесткости
7 – второстепенные фермы, перекрывающие атриумы
8 – связи по поясам ферм
9 – фахверковые фермы

инженерных коммуникаций. В 2008 году 3-я редакция проекта была утверждена экспертизой.

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКТИВНОЙ СХЕМЫ И НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЯ

Проект строительных конструкций высотного здания мэрии Москвы на участке № 15 ММДЦ «Москва-Сити» был разработан ЗАО «Курортпроект». Проект свайного основания и ограждения котлована разработал НИИОСП им. Н. М. Герсеванова.

КОНСТРУКЦИИ ОГРАЖДЕНИЯ КОТЛОВАНА

Глубина котлована (разница между черными отметками поверхности и отметкой дна котлована) находилась в пределах 25–27 м. В качестве ограждающей конструкции котлована была принята монолитная «стена в грунте» толщиной 800 мм. Устойчивость «стены в грунте» с северной и восточной части котлована обеспечивалась пятью ярусами грунтовых анкеров несущей способностью 60, 80 и 120 т. С западной стороны, где здание граничит с участком № 14, «стена в грунте» не выполнялась.

С четвертой, южной, стороны, где участок расположен в 9,5 м от центрального ядра ММДЦ «Москва-Сити», глубина котлована уменьшалась до 17 м. Устойчивость «стены в грунте» с этой стороны обеспечивалась установкой двух ярусов анкеров несущей способностью 60 т, бурение которых производилось через существующую «стену в грунте» центрального ядра. По периметру «стены в грунте» устраивалась обвязочная балка высотой 800 мм.

КОНСТРУКЦИИ СВАЙНОГО ОСНОВАНИЯ И ПЛИТНОГО РОСТВЕРКА

В соответствии с конструктивной схемой здания и грунтовыми условиями была принята свайно-плитная конструкция фундамента. Были запроектированы буронабивные сваи диаметром 1500 мм длиной 20 м и диаметром 900 мм длиной 17 м, объединенные плитным ростверком толщиной 4 м. Концы свай заглублялись в слой трещиноватых известняков. Расчетная нагрузка на сваю диаметром 1500 мм была принята 3100 т, на сваю диаметром 900 мм – 950 т. В сваях применялся бетон класса В40 по прочности, марки по водонепроницаемости W8.

Основная часть вертикальных нагрузок воспринималась центральным ядром, двумя лестнично-лифтовыми блоками и четырьмя группами «угловых» стен жесткости. Для выравнивания осадок (и как следствие – уменьшения изгибающих моментов в плите ростверка) под наиболее нагруженными стенами и колоннами устраивались кусты буронабивных свай диаметром 1500 мм с шагом 3000×3000 мм. В местах, где нагрузки меньше, шаг

свай становился реже, применялись сваи диаметром 900 мм.

Плитный ростверк толщиной 4 м служит для передачи и распределения нагрузки с несущих конструкций здания на свайное основание. Плитный ростверк был запроектирован из бетона класса В50 по прочности, марки по водонепроницаемости W8.

КОНСТРУКЦИИ КАРКАСА ЗДАНИЯ

Здание решено в монолитном железобетонном каркасе. Горизонтальные нагрузки, а также значительную часть вертикальных воспринимают центральное и четыре «угловых» ядра жесткости. Центральное ядро жесткости имеет размеры 44,8×29,2 м. Толщина наружных стен центрального ядра варьировалась с увеличением высоты от 800 до 400 мм, толщина «угловых» стен ядер изменялась от 600 мм на нижних этажах до 400 на верхних. Сечения колонн менялись в зависимости от местонахождения в плане и по высоте здания. Максимальные габариты наиболее нагруженных колонн в нижней части здания – 2000×2000, 2250×1500 мм. В стенах и колоннах здания до 13-го этажа включительно был предусмотрен бетон класса В90 по прочности, с 14-го по 43-й этажи был применен бетон класса В80, с 44-го по 72-й этажи – бетон класса В60. Следует отметить, что впервые в строительной практике России в таком большом объеме в вертикальных конструкциях высотного здания был применен столь высокий класс бетона по прочности – В90.

В здании запроектированы преимущественно безбалочные перекрытия с капителями. На технических этажах для перекрытия пролета над атриумами по фасаду предусмотрены балки-стенки. Большеразмерные фасадные системы, особенно в зоне атриумов, потребовали разработки большепролетных фахверковых конструкций, решенных преимущественно в виде ферм.

РАСХОД МАТЕРИАЛОВ НА НЕСУЩИЕ КОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЯ

К настоящему моменту закончены работы по возведению нулевого цикла здания. На возведение конструкций нулевого цикла было израсходовано 105 000 м³ бетона и 22 000 т арматуры, в том числе:

- на возведение конструкций «стены в грунте» – 6700 м³ бетона класса В25 и 1100 т арматуры;
- на изготовление буронабивных свай – 20 600 м³ бетона класса В40 и 4800 т арматуры;
- на возведение плитного ростверка – 45 000 м³ бетона класса В50 и 9000 т арматуры;

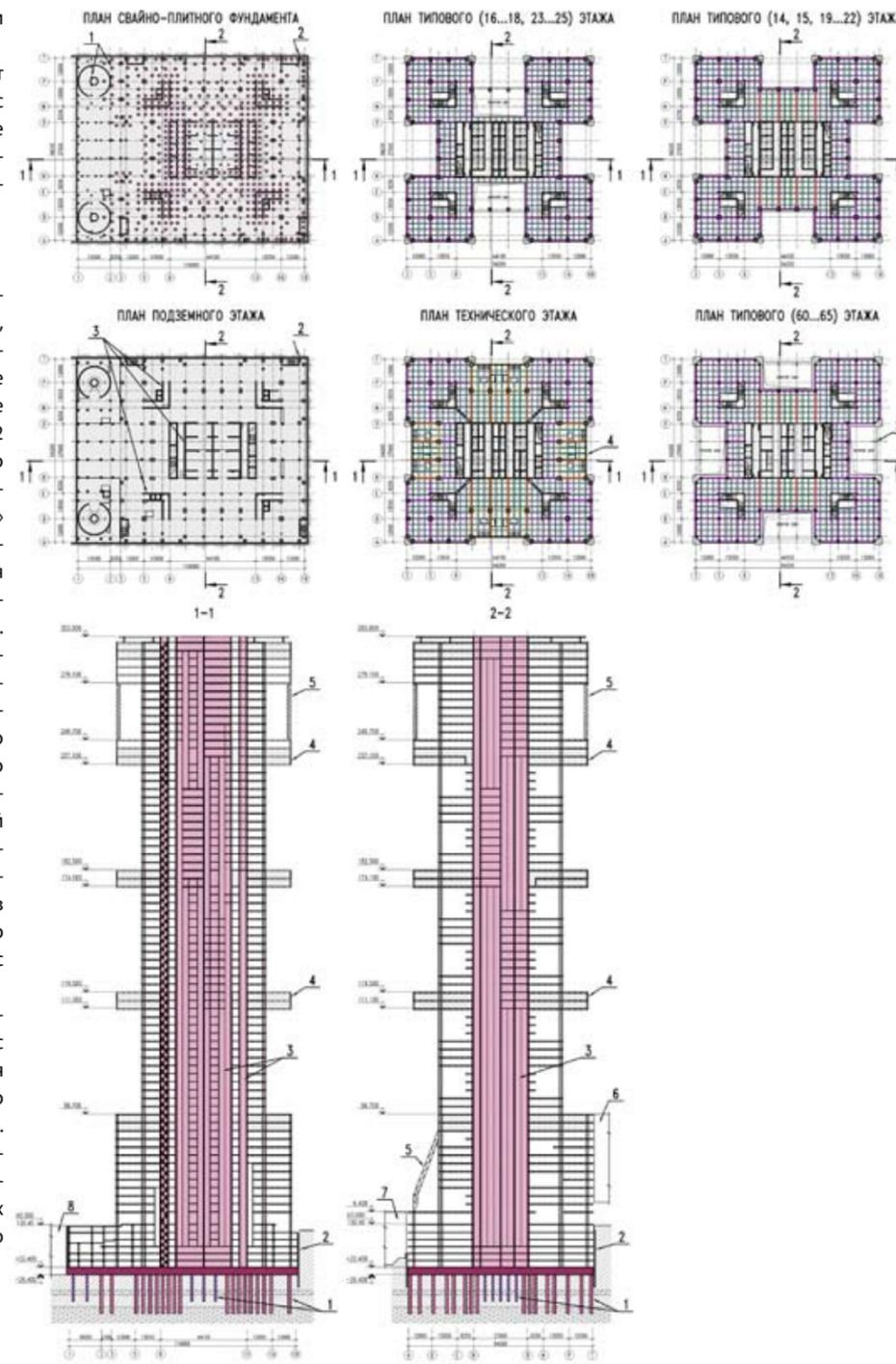
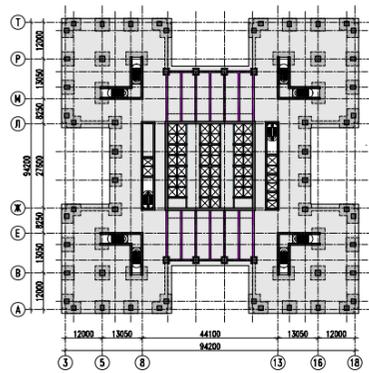
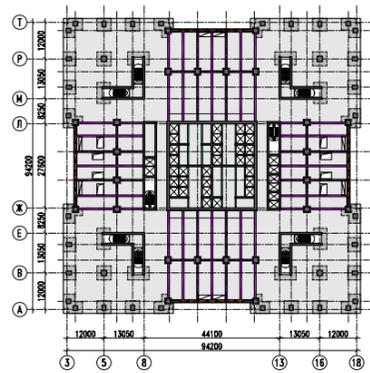


Рис. 2.
КОНСТРУКТИВНАЯ СХЕМА ЗДАНИЯ НА УЧАСТКЕ № 15 ММДЦ «МОСКВА-СИТИ» (2-Я РЕДАКЦИЯ ПРОЕКТА)
1 – буронабивные сваи Ø1500 и 900 мм
2 – стена в грунте
3 – железобетонные ядра жесткости
4 – железобетонные фасадные балки
5 – фахверковые фермы
6 – надземный переход между 1-м и 15-м участком
7 – подземный переход между центральным ядром и 15-м участком
8 – здание 14-го участка

ПЛАН ТИПОВОГО (14, 15, 19...22) ЭТАЖА



ПЛАН ТЕХНИЧЕСКОГО ЭТАЖА



ПЛАН ТИПОВОГО (16...18, 23...25) ЭТАЖА

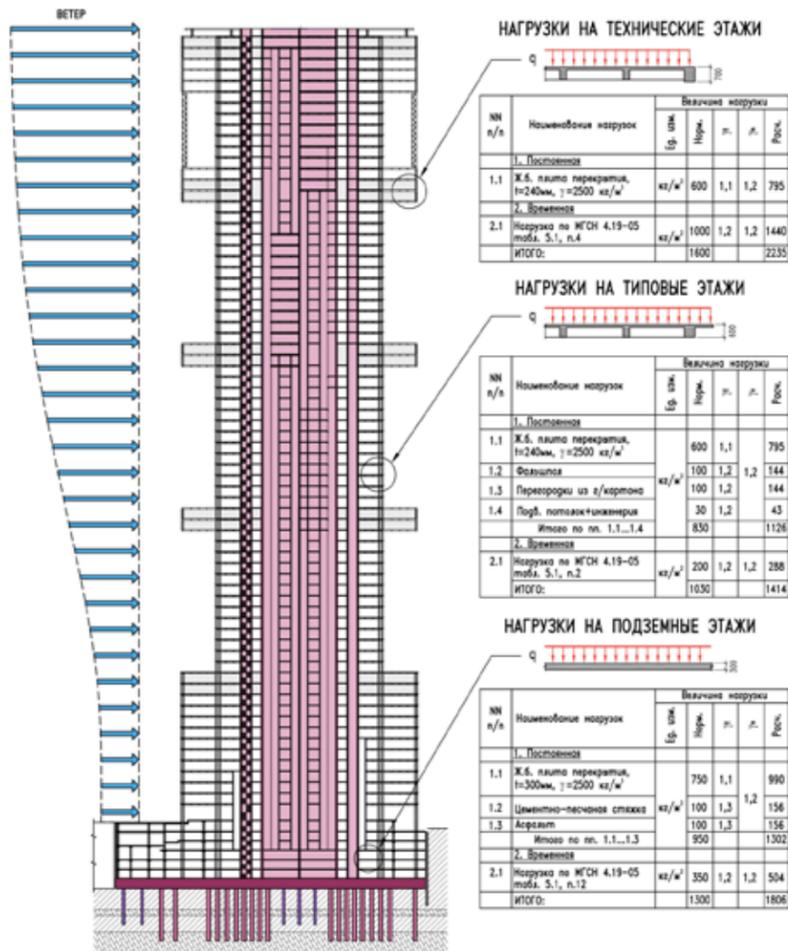
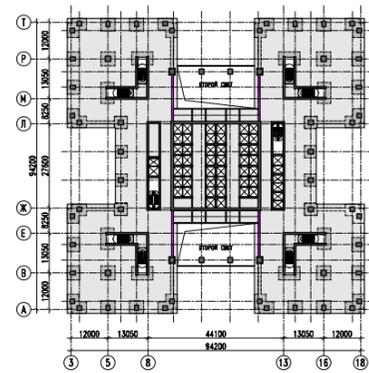


Рис. 3. Конструктивная схема здания на участке № 15 ММДЦ «Москва-Сити» (3-я редакция проекта)

Рис. 4. Схема приложения нагрузок на здание

• на возведение 6-этажного железобетонного каркаса подземной части здания – 9500 м³ бетона класса В90, 22 800 м³ бетона класса В60, 250 м³ бетона класса В40 и 7300 т арматуры.

Всего же для строительства здания потребуется 386 000 м³ бетона и 93 000 т арматуры.

РАСЧЕТ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЯ

В ходе проектирования здания был выполнен большой объем расчетов, необходимых для изучения работы и напряженно-деформированного состояния несущих конструкций (см. рис. 4–6). В про-

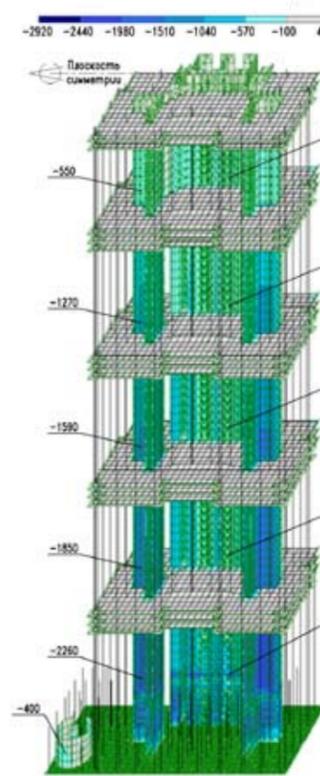
цессе работы расчетная модель здания многократно корректировалась или полностью собиралась заново (из-за архитектурных изменений, получения новых исходных данных, необходимости более точной детализации и т.п.). Последняя расчетная модель здания, выполненная на расчетном комплексе ЛИРА 9.4 PRO, насчитывает 295 000 конечных элементов.

В расчетной модели плитный ростерк был задан пластинчатыми элементами на «винклеровском» упругом основании с коэффициентом постели 1500 т/м², а сваи – вертикальными ферменными элементами с линейными жесткостями, равными 115 000 т/м и 45 000 т/м для свай диаметром 1500 и 900 мм соответственно. Железобетонные стены и плиты перекрытий заданы оболочечными конечными элементами, колонны и балки в составе перекрытий – стержневыми. Все второстепенные конструкции – лестничные марши, плиты пандусов, эскалаторы, фальшполы, конструкции ограждения атриума – учтены в расчетной схеме соответствующими нагрузками. Шаг разбивки схемы на конечные элементы был принят равным 1 м для конструкций подземной части и 2,5 м для конструкций надземной части. Расчет межэтажных перекрытий проводился на отдельных моделях с мелкой сеткой конечных элементов (шаг разбивки 0,5 м), позволявшей более точно определять усилия. Чтобы найти прогиб плит перекрытий, выполнялся расчет с учетом физической нелинейности.

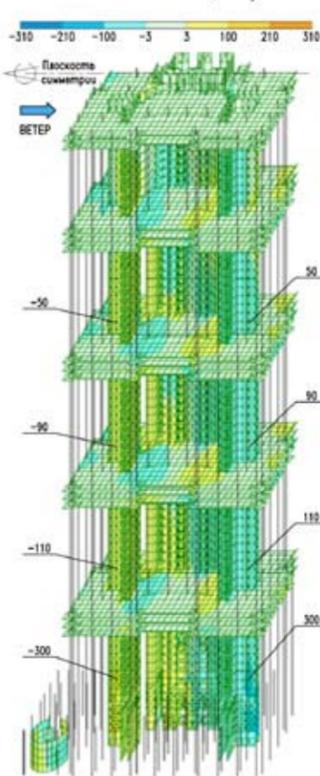
При задании жесткостей железобетонных элементов конструкций рассчитывался приведенный модуль деформаций, учитывающий класс бетона, процент армирования, длительность нагружения и условия эксплуатации (условия эксплуатации необходимо учитывать при назначении коэффициента ползучести). Учитывая разную длительность воздействий, влияющих, в свою очередь, на реологические свойства бетона (ползучесть), для получения усилий и перемещений в несущих элементах от статической (собственный вес, временная нагрузка на перекрытия) и ветровой нагрузок был выполнен расчет двух схем с разными жесткостями одних и тех же элементов.

Расчет высотных зданий на ветровую нагрузку часто приводит к необходимости увеличения сечений несущих элементов конструкций, повышения общей жесткости здания за счет аутригеров и т.п.

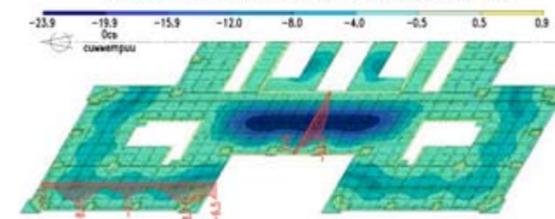
УСИЛИЯ В СТЕНАХ ОТ ПОЛНОЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ, тс/м²



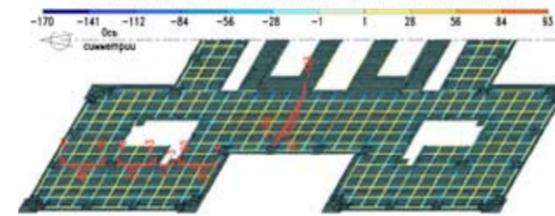
УСИЛИЯ В СТЕНАХ ОТ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ, тс/м²



ПРОГИБЫ ПЛИТЫ ПЕРЕКРЫТИЯ ТИПОВОГО ЭТАЖА, мм



ИЗГИБАЮЩИЕ МОМЕНТЫ В БАЛКАХ ТИПОВОГО ЭТАЖА, тс·м



ПОПЕРЕЧНЫЕ СИЛЫ В БАЛКАХ ТИПОВОГО ЭТАЖА, тс

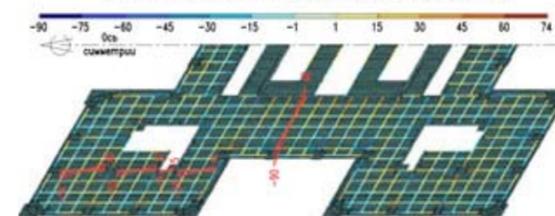


Рис. 5. Усилия в стенах ядер жесткости

Рис. 6. Прогибы, изгибающие моменты и поперечные силы в балках типового этажа

Особенно часто такая потребность возникает при расчете по II группе предельных состояний – на определение горизонтального смещения верха здания или на определение ускорения колебаний перекрытий верхних этажей. В нашем случае расчет на ветровую нагрузку не был определяющим – здание сильно развито в плане (отношение высоты к основанию 3 : 1), имеются симметрично расположенные мощные ядра жесткости. Перемещения верха здания от ветровой нагрузки составили 1/2500 его высоты, что в 3,5 раза меньше предельно допустимого значения $f_{ult} = 1/715$ согласно п. 6.27 МГСН 4.19-2005. Ускорение колебаний перекрытий пяти верхних этажей при действии ветровой нагрузки составило 0,014 м/с², что значительно ниже предельно допустимой величины $a_{ult} = 0,08$ м/с². Таким образом, комфортность пребывания на верхних этажах здания обеспечена. В рамках проверки устойчивости несущих конструкций здания на действие прогрессирующего обрушения был рассмотрен ряд наиболее опасных схем локальных разрушений, в том числе разрушение угловых колонн, обрушение участка перекрытия площадью 80 м², удаление участка ядра жесткости. Расчет производился с учетом физической нелинейности. Анализ конечно-элементной модели показал, что армирования плиты перекрытия типового этажа, принятого на основе расчета на эксплуатационную нагрузку, недостаточно для восприятия нагрузок, возникающих при аварийных воздействиях. Соответственно было скорректировано армирование типового этажа для обеспечения защиты здания от аварийных воздействий.

Проведенные расчеты показали, что здание соответствует действующим нормам в части требований по несущей способности, пространственной устойчивости, жесткости, устойчивости на действие прогрессирующего обрушения.

В ходе работы над проектом авторы столкнулись с рядом проблем, обычно не возникающих при проектировании зданий небольшой этажности. Серьезной проблемой стало отсутствие в российских нормах требований по проектированию конструкций из бетонов классов В70–В90 и выше. К примеру, в Еврокоде-2 (европейские нормы по проектированию железобетонных конструкций) приведены прочностные и деформативные характеристики бетонов классов по прочности до В105 включительно, а также методы расчета конструкций из них. Высокопрочные бетоны отличаются по своим свойствам от обычных (класса В25, В30), они более хрупкие, для них опаснее трещины и концентраторы напряжений. Эти особенности должны учитываться в коэффициентах условий работы, требованиях по конструированию. Мало исследованы вопросы ползучести и усадки высокопрочных бетонов и конструкций из них. Необходимые для расчета материалы взяты из Инструкции по расчету и проектированию конструкций из высокопрочных бетонов классов В60–В90, выпущенной Лабораторией химических добавок и модифицированных бетонов НИИЖБ и НИИСФ в 2008 году.

О строительстве нулевого цикла высотного здания мэрии Москвы на участке № 15 ММДЦ «Москва-Сити» и некоторых деталях рабочего проекта его строительных конструкций читайте во второй части статьи в следующем номере журнала. ■