

Реальная физика: уроки строительного мониторинга

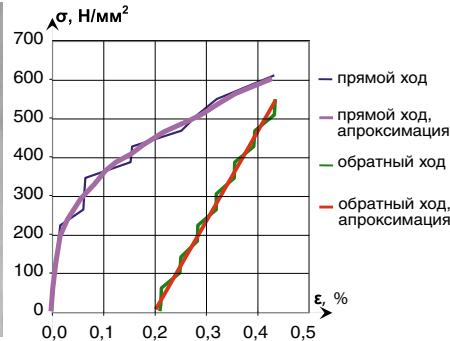
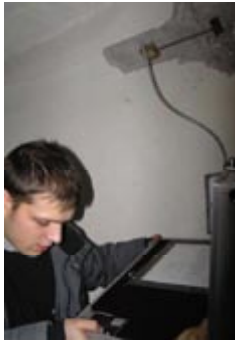


Рис. 1 Диаграмма упругости арматурной стали

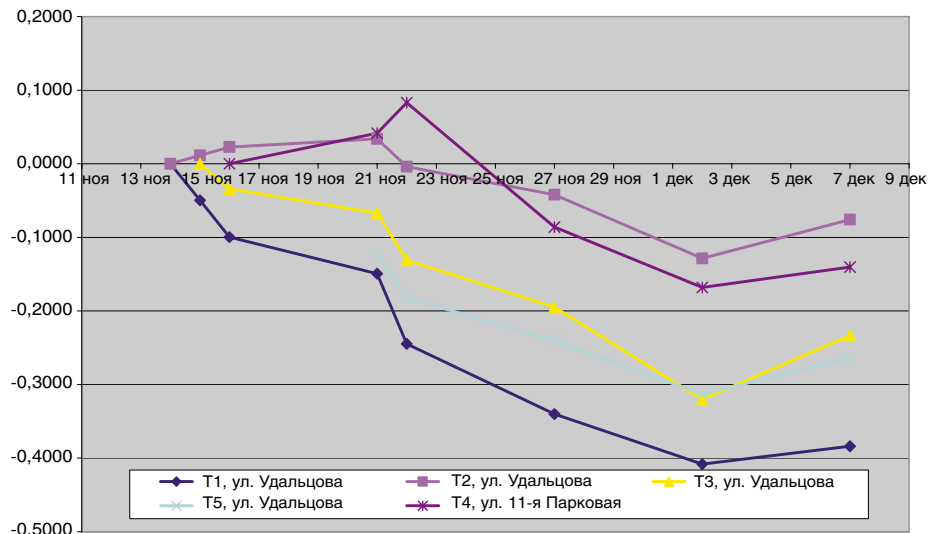


Рис. 2 Мониторинг динамики стеновых трещин на строительных сооружениях в Москве (ноябрь – декабрь 2006)

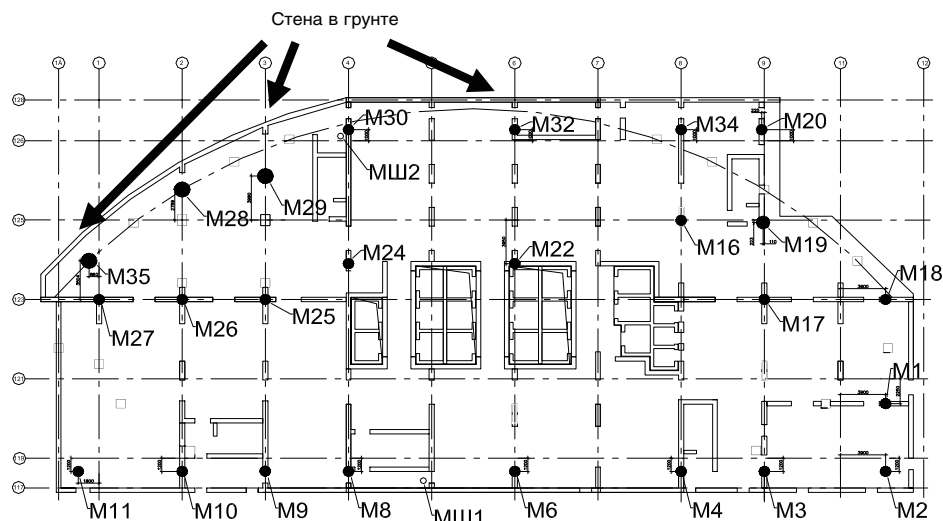


Рис. 3 Схема установки волоконно-оптических датчиков давления в грунте

к.ф.-м.н. **Ф.А. Егоров**, к.т.н. **В.И. Поспелов**,
А.П. Неугодинов
 ООО «Мониторинг-Центр», Москва
В.А. Быковский,
 Уральский филиал ООО «Мониторинг-Центр»,
 Каменск-Уральский
 к.т.н. **А.Н. Давидюк**, к.т.н. **О.А. Ларин**
 ОАО «КТБ ЖБ»

Задачи строительного мониторинга формулируются достаточно ясно и кратко: контролировать соответствие расчетных и измеряемых параметров, информировать о состоянии объекта в целом и тем самым обеспечить безопасность во время строительства или эксплуатации. Сложный механизм измерительного мониторинга как научно-технической процедуры определяется приборной базой с одной стороны, и многообразием строительных технологий с другой. В такой ситуации всегда возникают вопросы методического и метрологического характера, как-то: какие параметры измерять, в каких точках объекта устанавливать датчики, с какой частотой и в какие периоды регистрировать показания, как интерпретировать полученные данные и т.д. Во всем этом непросто комплексе вопросов как-то само собой разумеется, что приборная база безупречна, а данные, которые получают в ходе мониторинга, абсолютно точны и достоверны. Конечно, у всех приборов есть паспортная информация о пороге чувствительности, погрешности и диапазоне измеряемых величин, но немногие задумываются о том, что данные эти зачастую получены для лабораторных или специально созданных условий измерений. Поэтому, приходя на стройплощадку, исследователь должен учитывать, что эксплуатироваться приборы будут в жестких условиях (температура, влажность, загрязненность, вибрация, установка внутри железобетона и т.п.). То есть приборы должны обладать дополнительной «выносливостью», сохраняя заданные погрешности. И здесь естественным образом возникает вопрос о достоверности измеренных показаний. Безусловно, ни у кого нет возможности на стройке параллельно с мониторингом проводить еще и верификацию приборов при помощи лабораторных методов. Но помимо паспортных данных есть еще один способ понять, насколько точно работают датчики в условиях процесса возведения здания. Способ этот достаточно очевидный: сопоставить показания приборов с реально происходящими физическими процессами. Наверное, это не совсем корректный способ с точки зрения количественного подхода, но для неискушенного в сложных измерительных схемах потребителя качественная корреляция показаний с реальными событиями иногда важнее научной аргументации. Вот, исходя из этих простых предпосылок, проанализиру-

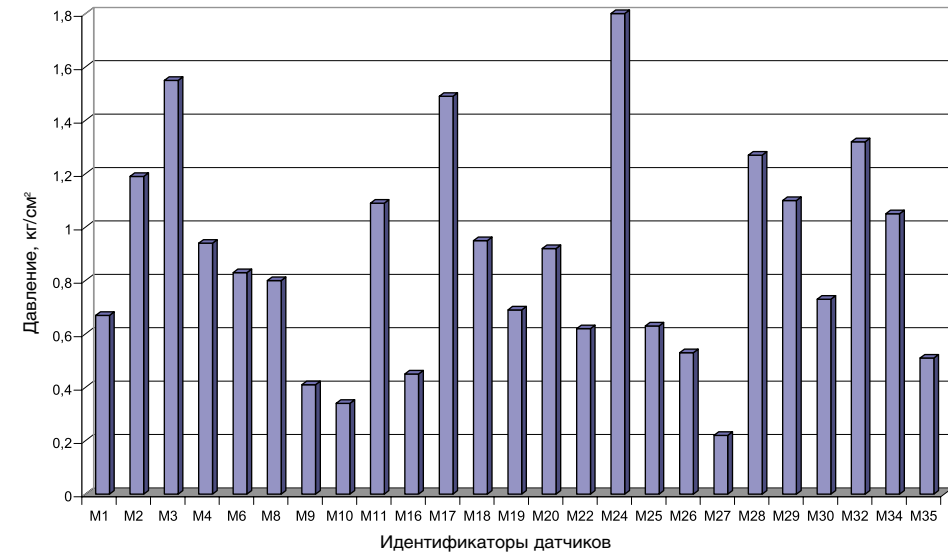


Рис. 4 Давление, регистрируемое всеми грунтовыми датчиками, 18.01.07

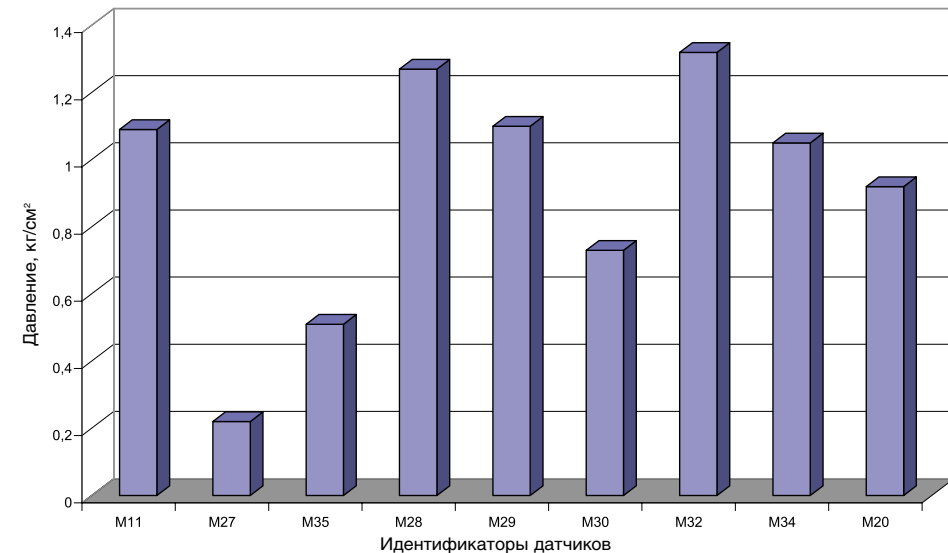


Рис. 5 Давление, регистрируемое грунтовыми датчиками вдоль стены в грунте, 18.01.07

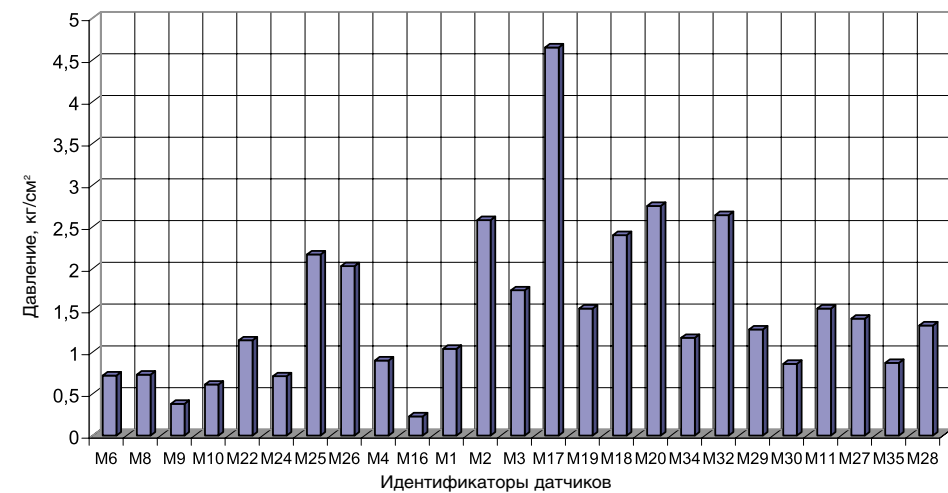


Рис. 6 Давление, регистрируемое всеми грунтовыми датчиками, 21.03.07

ем качество волоконно-оптических датчиков деформаций и давления, разработанных в ООО «Мониторинг-Центр», на примере лабораторных испытаний и на основе данных строительного мониторинга.

Урок первый: диаграмма упругости

16 мая 2006 года в Некрасовской лаборатории ОАО «КТБ ЖБ» проводились испытания волоконно-оптического датчика деформаций. Схема испытаний была следующей. На арматурный стержень стали А500С диаметром 25 мм закреплялся датчик. Принцип действия и схема действия датчика описывались в ТС №3-6, 2005 год. Измерения сигналов производились при помощи ИСВОД (измеритель сигналов волоконно-оптических датчиков). Затем арматура с датчиком закреплялась в разрывной машине, и арматура подвергалась растяжению (прямой ход), а затем нагрузка снималась (обратный ход). Нагрузка и разгрузка происходили пошагово, с выдержкой на каждом шаге 1 минута. Результаты испытаний представлены на диаграмме упругости (рис. 1). Отметим, прежде всего, тот факт, что качественный вид диаграммы полностью соответствует классическому виду зависимости σ - ϵ . Если говорить о количественных показателях, то предел текучести $\sigma_{0.2}$, в зависимости от завода-изготовителя стали, согласно нормам, находится в диапазоне 555–596 Н/мм², что подтверждается результатами на рис. 1.

Урок второй: динамика раскрытия трещин

В период с 07.11.06 по 10.12.06 специалисты ОАО «КТБ» ЖБ» и ООО «Мониторинг-Центр» проводили мониторинг технического состояния строительных конструкций СДЮШОР «Олимпиец» — теннисные корты (ул. Удальцова, 54) и СК «Трудовые резервы» — бассейн (ул. 11-я Парковая, 49).

Основной задачей инструментального мониторинга было получение информации о процессе раскрытия трещин в стеновых конструкциях. На первом объекте было установлено 4 волоконно-оптических датчика деформаций (Т1, Т2, Т3, Т5), на втором объекте контролировалась одна трещина при помощи датчика Т4. В целом было отмечено закрытие контролируемых трещин, что характерно для положительной температуры окружающей среды. (Наружная температура

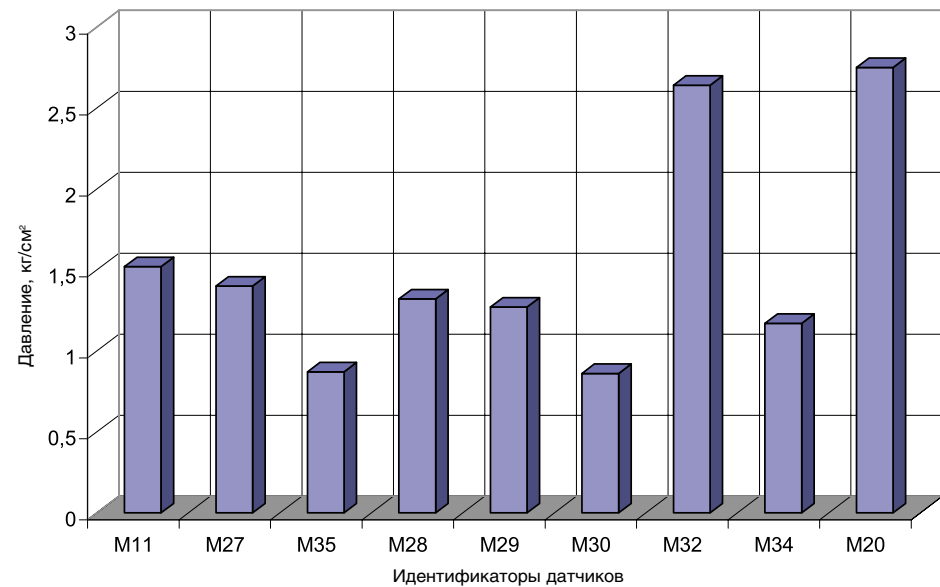


Рис. 7 Давление, регистрируемое грунтовыми датчиками вдоль стены в грунте, 21.03.07

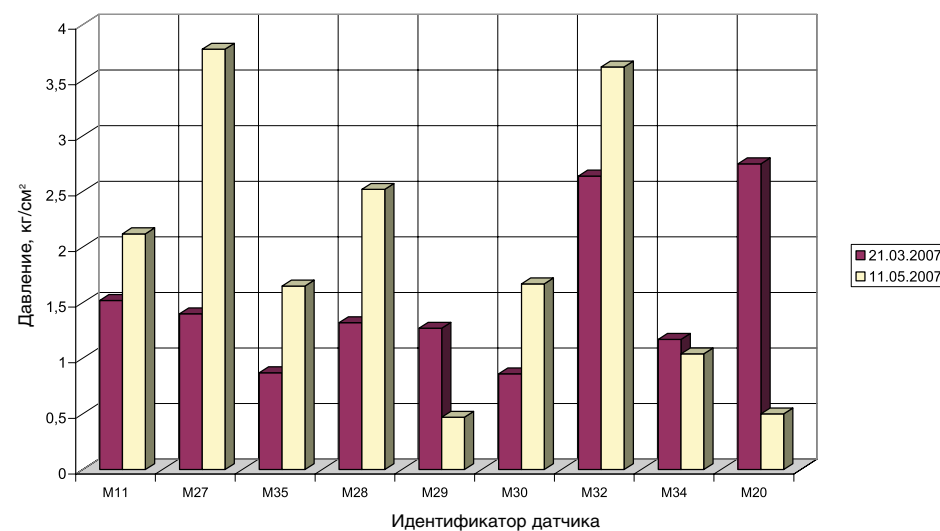


Рис. 8 Давление, регистрируемое грунтовыми датчиками вдоль стены в грунте, 21.03.07 и 11.05.07

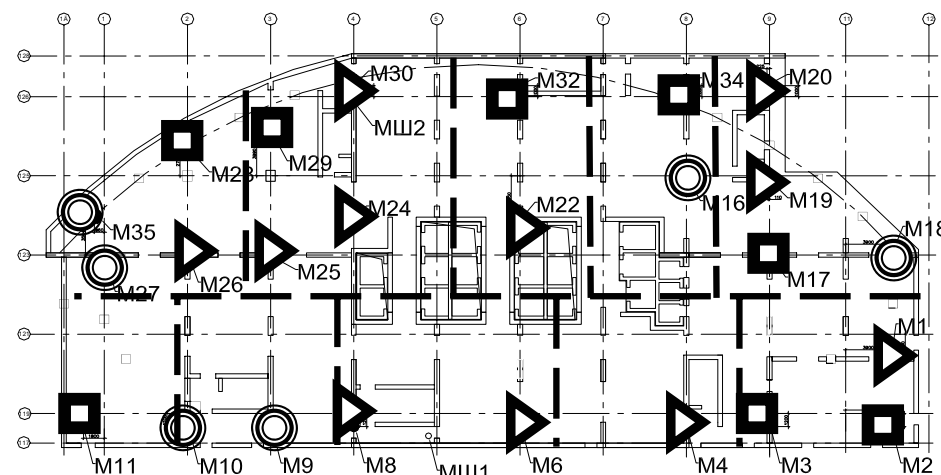


Рис. 9 Распределение «сильного» (обозначено □), «среднего» (обозначено Δ) и «слабого» (обозначено ○) давления в грунте на 18.01.07.

тура в Москве во время мониторинга находилась в диапазоне $0 \div +7^\circ\text{C}$). Еще одной характерной особенностью представленных результатов является общая асимптотика динамики раскрытия трещин. Сжатые сроки мониторинга не позволили проследить развитие ширины раскрытия трещин в течение длительного периода.

Урок третий: ощущение стены

20 сентября 2006 года на строящемся многофункциональном комплексе «Град-экс» началась установка системы мониторинга на базе волоконно-оптических датчиков ООО «Мониторинг-Центр». В течение 8 месяцев, по мере возведения здания, на этом объекте было установлено 130 датчиков (ТС №2, 2007). Принципиальной особенностью упомянутой системы мониторинга является тот факт, что контроль за состоянием конструкции начинается сразу после монтажа датчиков, во время строительства.

Схема установки датчиков приведена на рис. 3, где дополнительно указано положение стены в грунте. Измерения давления в грунте, проводившиеся начиная с первых дней установки датчиков, показали явно выраженную тенденцию максимальной нагрузки вблизи стены в грунте, что соответствовало и предварительным результатам численного моделирования. На рис. 4–7 показаны величины давлений, регистрируемых датчиками 18.01.07 и 21.03.07. При этом исследуются два варианта показаний:

- Все датчики по плите (рис. 4, 6);
- Датчики, размещенные вдоль стены в грунте (рис. 5, 7).

Как и ожидалось, соседство со стеной в грунте оказывает существенное влияние на давление в основании. Расчеты, проведенные при проектировании, давали ту же картину, а именно: возле стены в грунте концентрируются максимальные нагрузки (или напряжения). При этом измерения с разницей в два месяца только подтвердили это положение: мартовские измерения фиксируют по-прежнему «лидерство» области вблизи стены в грунте, только абсолютные величины в среднем выросли. Дальнейшая динамика показаний датчиков в этой области показана на рис. 8, где дана сравнительная картина показаний датчиков около стены в грунте от 21.03.07 и 11.05.07. Видно очевидное монотонное возрастание нагрузки, но при этом небольшая часть датчиков скорректировала показания в меньшую сторону (M20, M29, M34), что говорит о влиянии многих факторов, помимо влияния стены в грунте.

Урок четвертый: память бетона

Интересно наблюдать динамику изменения давления в грунте по мере воз-

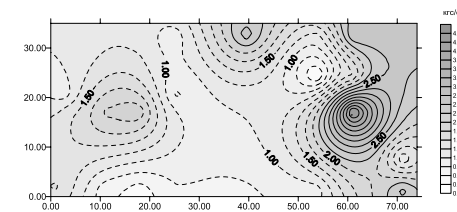


Рис. 10 Давление 21.03.07

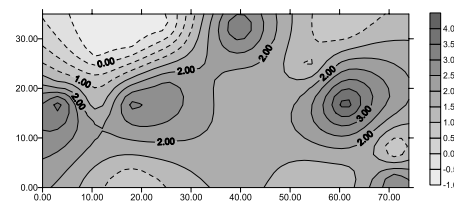


Рис. 11 Давление 11.05.07

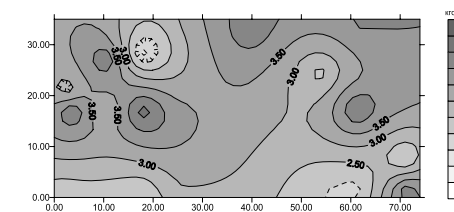


Рис. 12 Давление 15.06.2007

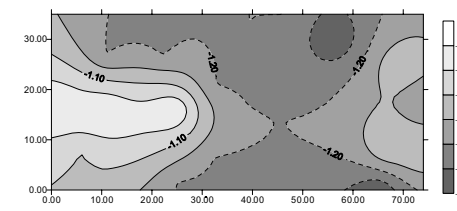


Рис. 13 Осадки 28.03.07

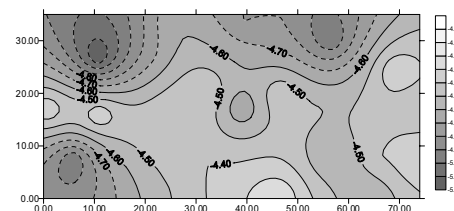


Рис. 14 Осадки 11.04.07

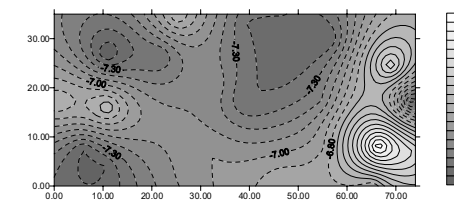


Рис. 15 Осадки 25.04.07

ведения здания и пытаться понять, какими причинами обусловлено то или иное увеличение/уменьшение показаний. Очевидно, что если средние показания реально замеренных давлений близки к расчетным, то это лишнее подтверждение правильности и работы датчиков, и построенной теоретической модели. Однако есть ситуации, которые в расчетах, в силу сложности задачи, детально не моделируются, а измерения их фиксируют. Заранее не известные значения давлений, измеренные в тот или иной момент времени, выдают иногда не всегда очевидные картины состояния контрольного объекта. Именно здесь лишний раз подтверждается важность мониторинга как непрерывного процесса, который существенно дополняет расчетные данные, которые дают понимание только дискретных этапов строительства. Для примера рассмотрим данные измерения давления в грунте, зафиксированные на ранней стадии заливки фундаментной плиты. На рис. 9 показаны величины давления в грунте, условно разбитые на три группы: «слабое» — от 0 до 0,5 кг/см², «среднее» — от 0,5 до 1 кг/см², «сильное» — свыше 1 кг/см². При этом пунктиром показаны так называемые «захватки» — участки, по которым происходила последовательная заливка фундаментной плиты (заливка осуществлялась в период 20.09.06 — 19.11.06). При внимательном сопоставлении распределения «сильного», «среднего» и «слабого» давления по «захваткам», можно сделать вывод о наличии определенной закономерности. В большинстве «захваток» присутствуют пары: «сильное»–«слабое» или «сильное»–«среднее» или «среднее»–«слабое» давление. Можно предположить, что бетон «помнит» о том, как заливался, и поэтому каждая «захватка» до определенного момента време-

ни существует как макроэлемент плиты, находясь в определенной граничной связи со своими соседями. В такой модели каждый макроэлемент плиты имеет свой центр максимального давления и свою точку минимального давления, в соответствии с принципом рычага. При этом большинство «средних» давлений расположено по границам «захваток», играя роль «сшивающих» граничных условий. Таким образом, датчики давления фиксируют эволюцию бетонной плиты, которая сначала живет отдельными участками, а затем, по мере набора прочности бетоном, все более и более обретает признаки монолитного тела. Интересно заметить, что расчетные модели, по которым определяются нагрузки и деформации фундаментной плиты, строятся на методах конечных элементов (МКЭ), где плита разбивается на множество мелких элементов с соответствующими граничными условиями. Датчики показывают, что в реальных условиях в течение некоторого периода плита тоже работает в конечно-элементном формате.

Урок пятый: осадки и давление

Параллельно с измерением давления в грунте по мере возведения здания проводились измерения осадок. Подобная методика, принятая во всем мире, является безусловно необходимой для того, чтобы максимально полно отобразить картину работы системы «основание–фундамент–надземная часть здания». На рис. 10–12 показаны изолинии распределения давления в грунте, зафиксированные датчиками, а на рис. 13–15 показаны изолинии осадок, построенные по результатам геодезических измерений. Основные выводы, которые можно сделать, исходя из этих иллюстраций, следующие.

По мере нарастания этажности:

- общая локализация областей максимального давления под плитой сохраняется (рис. 10–12);
 - геометрические размеры областей максимального давления уменьшаются, но сами области дробятся, занимая большие площади (рис. 11–12);
 - происходит выравнивание давления по площади основания (рис. 12);
 - области с минимальными осадками являются областями максимального давления в грунте (рис. 10–15).
- Последний вывод замечателен своим физическим смыслом: образно говоря, это свидетельство того, что в грунте имеются места, на которые плита опирается как на сваи. Эти места воспринимают максимальную нагрузку (демонстрируя, соответственно, максимальное давление при измерении датчиками).

Заключение

Изложенные выше наблюдения необходимо рассматривать как важный материал для осознания необходимости строительного мониторинга, а также как подтверждение удовлетворительного качества, которое демонстрируют волоконно-оптические датчики в таком мониторинге. Время внедрения измерительного автоматизированного мониторинга в строительный процесс только наступает, и в этих условиях существенным является выбор точного и надежного инструментария.

Авторы выражают искреннюю благодарность всем, кто помог, помогает и принимает участие в проекте становления волоконно-оптических систем мониторинга строительных объектов. К счастью, список соратников и единомышленников велик и постоянно пополняется, но особенно хочется поблагодарить проф. З.Г. Тер-Мартirosяна (МГСУ), Д.В. Кораг (ИТТ-Korea Ltd.), И.В. Николаева (Каменск-Уральский).