

О.А. МАКОВЕЦКИЙ, к.т.н., доцент,
И.И. ХУСАИНОВ, аспирант
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия

УДК 624.131

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СТРУЙНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ ДЛЯ УСТРОЙСТВА ПОДЗЕМНЫХ ЧАСТЕЙ ЖИЛЫХ КОМПЛЕКСОВ

Ключевые слова: струйная цементация, деформация основания, геомассив

Наведено досвід вивчення покращення геотехнічної основи методом закріплення струминною цементациєю, та вибрано найбільш просту, наближену до реальності, адекватну математичну модель для розрахунку.

Приведен опыт изучения улучшения геотехнического основания методом закрепления струйной цементацией, и выбрана наиболее простая, приближенная к реальности, адекватная математическая модель для расчета.

The experience of learning to improve the geotechnical subgrade method of fixing the jet grouting, and choose the most simple approximation to reality, adequate mathematical model for the calculation

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими задачами. Опыт строительства современных жилых комплексов показывает, что наиболее типичным объемно-планировочным решением является устройство локальной высотной жилой части и развитой в плане одно-, двухуровневой подземной автомобильной парковки. Для реализации такого решения в сложных инженерно-геологических условиях необходим

комплекс мероприятий, обеспечивающих эксплуатационную надежность подземной части на весь срок эксплуатации здания. Пример реализации такого комплекса приводится в данной статье.

Обзор последних источников исследований и публикаций. Сегодня во многих странах мира для решения различных геотехнических задач, в том числе и закрепления стенок глубоких котлованов применяют струйную цементацию

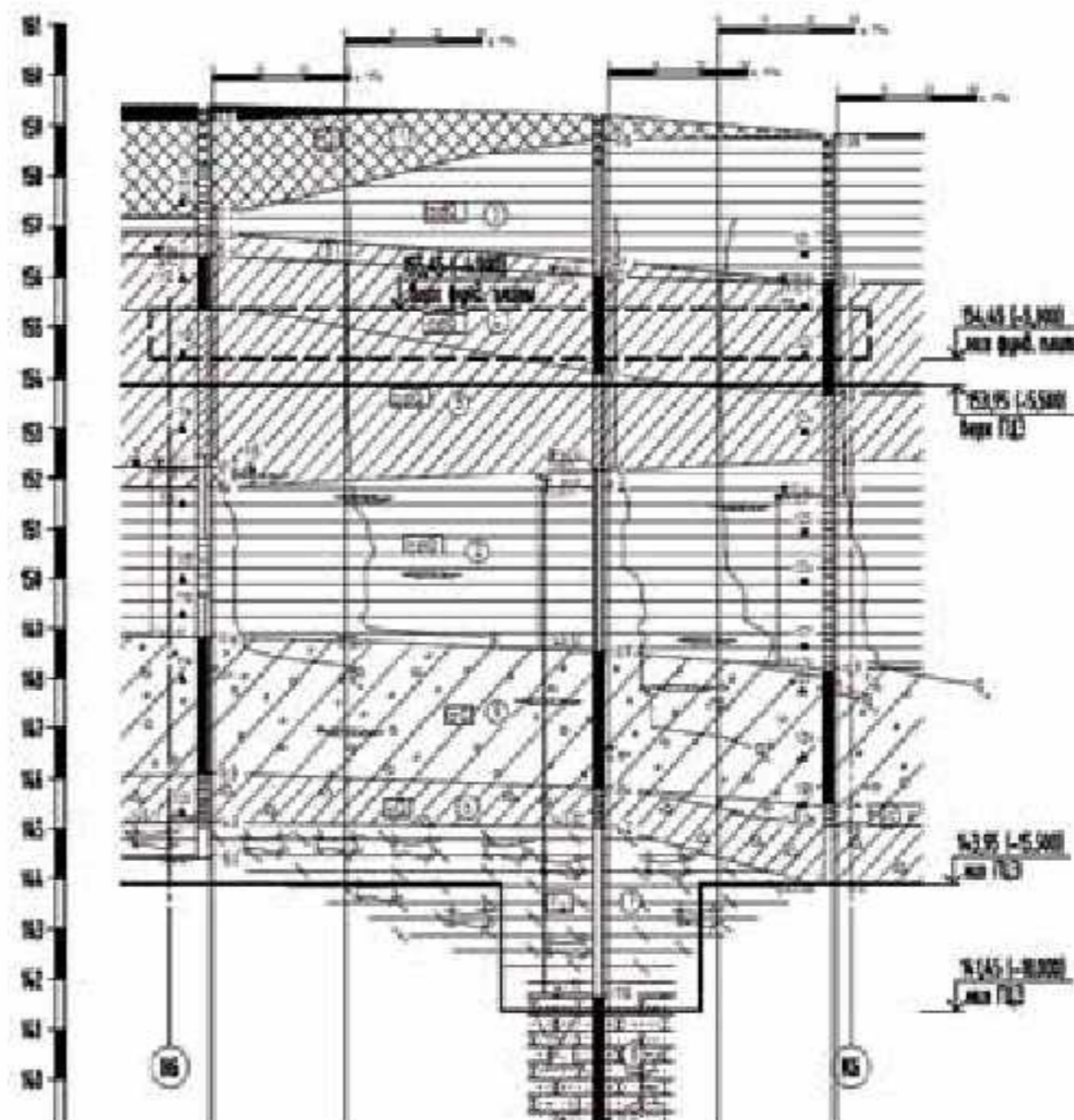


Рис. 1. Инженерно-геологические условия площадки строительства

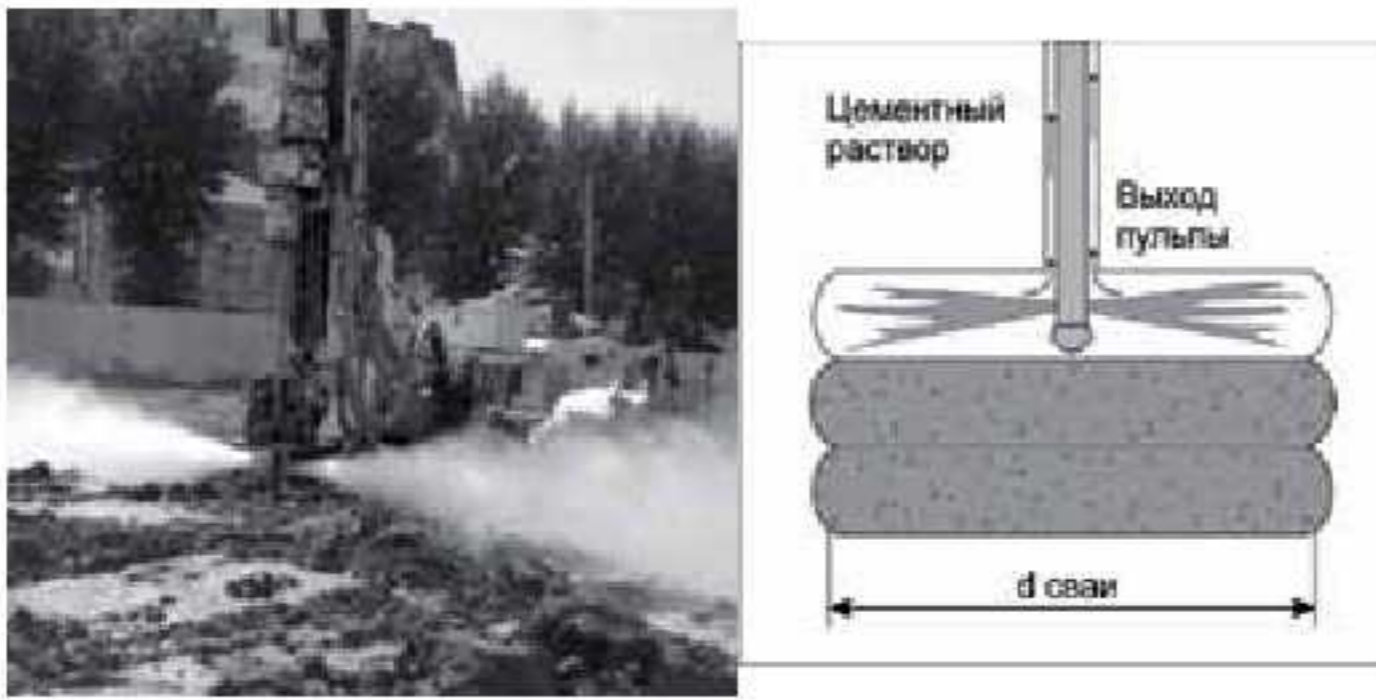


Рис. 2. Технология струйной цементации

грунтов (англ. jet grouting) [1 – 5].

Выделение нерешенных прежде частей общей проблемы, которым посвящается статья. При этом решение таких геотехнических задач не обходиться без численного моделирования напряженно-деформированного состояния рассматриваемой системы «грунт – элементы закрепления» [6]. При проектировании возникает вопрос выбора наиболее оптимальной и грамотной расчетной модели подобной системы, которая бы наиболее полно отображала свойства материалов, граничные условия и т.д.

Целью данной работы является изучение метода улучшения геотехнического основания закреплением струйной цементацией и выбор наиболее простой, приближенной к реальности, адекватной математической модели для расчета.

Изложение основного материала исследования. Площадка строительства расположена в условиях сложившейся застройки центральной части города Перми. Размеры в плане автомобильной парковки составляют 68,2 x 49,7 м, восьмиэтажного жилого здания – 46,8 x 44,2 м. Глубина подземной части – 4,6 – 5,0 м. Конструкции надземной и подземной части здания выполнены из монолитного железобетона. Фундамент – монолитная железобетонная фундаментная плита толщиной 800 мм.

Инженерно-геологические условия площадки строительства представлены на рис. 1.

В геоморфологическом отношении площадка расположена на IV надпойменной террасе р. Кама.

В строении площадки принимают участия следующие инженерно-геологические элементы:

ИГЭ-1 – насыпной грунт (асфальт, суглинок со щебнем и обломками кирпичей до 5 – 10%), мощность – 0,05 – 2,2 м;

ИГЭ-2 – глина от полутвердой до тугопластичной консистенции, мощность – 0,3 – 3,0 м;

ИГЭ-3 – суглинок мягкопластичной, реже тугопластичной консистенции, мощность – 0,3 – 2,5 м, модуль деформации $E = 6,1 – 8,4$ МПа;

ИГЭ-4 – суглинок текучепластичной и текучей консистенции, мощность – 1,0 – 2,2 м, модуль деформации – 4,3 – 5,5 МПа;

ИГЭ-5 – гравийный грунт с супесчаным заполнителем, мощность – 1,0 – 3,1 м.

На период изысканий (февраль – март 2011 г.) вскрыто три горизонта подземных вод: грунтовые воды в суглинках от мягкопластичной до текучей консистенции, появившийся уровень – на глубине 4,0 – 5,0 м, установившийся уровень – на глубине 3,0 – 3,9 м; грунтовые воды в гравийных грунтах с супесчаным заполнителем, вскрыты на глубине

10,6 – 13,5 м, установившийся уровень – на глубине 6,7 – 10,1 м; воды напорные с величиной напора 1,9 – 6,5 м; трещинно-грунтовые воды верхнепермских отложений (песчаников), вскрыты на глубине 16,7 – 17,5 м, установившийся уровень – на глубине 7,0 – 7,4 м; воды напорные с величиной напора до 9,7 – 10,1 м.

Горизонты подземных вод гидравлически взаимосвязаны между собой. В особо неблагоприятные периоды года возможно повышение уровня грунтовых вод на 1,0 – 1,5 м от замеренных и появления «верховодки» на границе насыпных и глинистых грунтов.

В данных геологических условиях основными задачами являются: на период строительства – обеспечение устойчивости стен котлована и ограничение дополнительных деформаций существующих зданий и сооружений; на период эксплуатации – обеспечение восприятия горизонтального давления грунта и подземной воды, устройство вертикального противofильтрационного экрана, создание высоких и однородных деформационных характеристик грунтового основания в пятне застройки здания.

Одним из возможных решений поставленного комплекса задач может быть использование технологии струйной цементации грунта (рис. 2).

Технология основана на использовании энергии высоконапорной струи цементного раствора для перемешивания природного грунта с частичным его замещением цементным раствором. Подача струи цементного раствора осуществляется одновременно с подачей струи сжатого воздуха, что позволяет увеличить радиус воздействия разрушающей струи.

Производство работ по закреплению грунтов включает следующие операции: бурение технологических скважин до нижней отметки закрепления (при этом контролируется реальная мощность инженерно-геологического элемента) и подъем бурового инструмента с закреплением грунта в проектном интервале. Расход цемента составляет от 500 до 900 кг на кубический метр закрепленного грунта. При этом имеем следующие характеристики закрепленного грунта: прочность на одноосное сжатие $R_{сж} = 1,5 – 3,0$ МПа, модуль деформации $E = 2,0 – 4,0$ ГПа, коэффициент фильтрации $K_{ф} = 1,4–1,6 \times 10^{-6}$ см/с.

Для обеспечения устойчивости котлована и устройства вертикального противofильтрационного экрана выполнена ограждающая стена из секущих грунтоцементных свай (ГЦС) диаметром 600 мм (рис. 3). Расположение элементов



Рис. 3. Ограждающая стена из секущих грунтоцементных свай



Рис. 4. Вид сверху грунтоцементного элемента

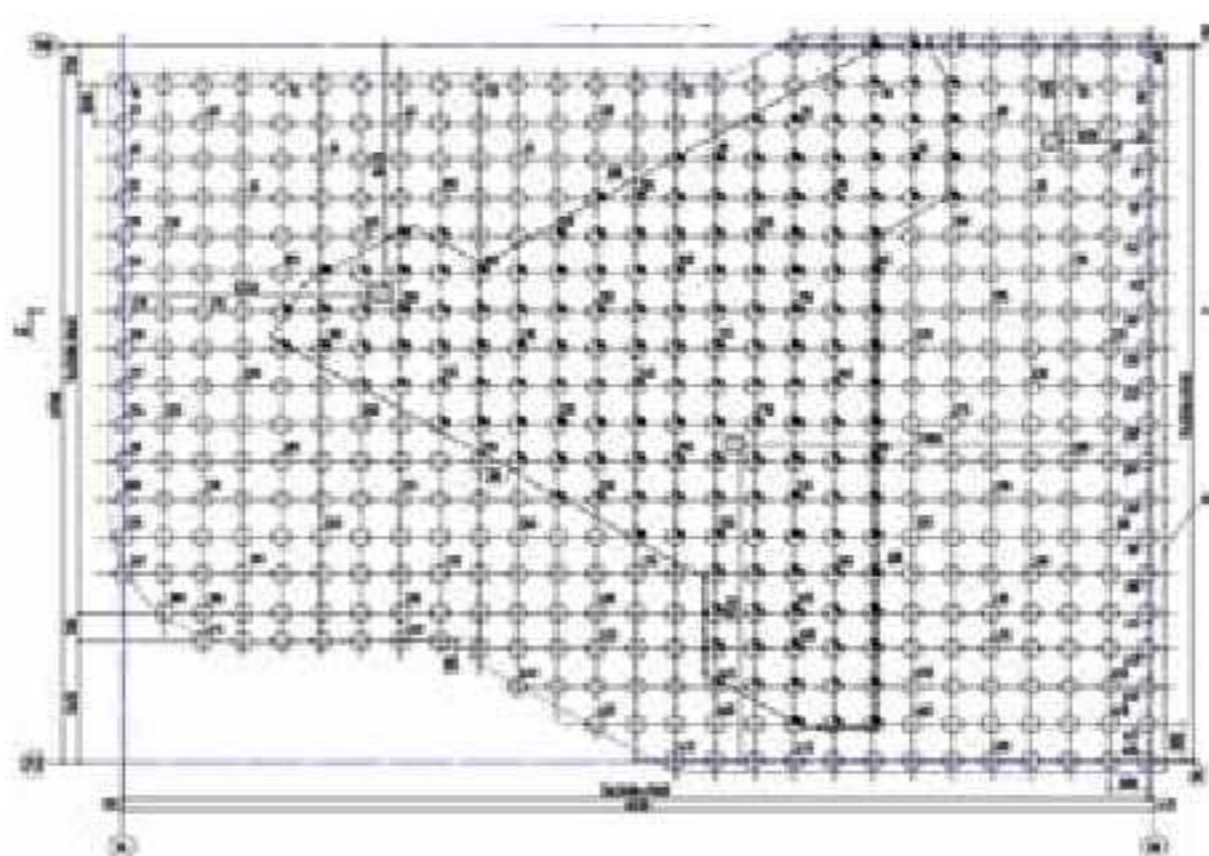


Рис. 5. Схема расположения грунтоцементных элементов для создания геомассива

ограждения в плане – двухрядное с межосевым расстоянием 200 мм, шаг свай в ряду – 450 мм. Длина элементов – 7,0 – 7,8 м, анкеровка ниже дна котлована – 2,5 – 3,0 м.

Ограждающая стена воспринимает горизонтальное давление грунта, гидростатическое давление воды и нагрузки на бортах котлована. Устойчивость ограждающей стенки обеспечивается устройством анкерного пояса из ГЦС диаметром 600 мм, объединенных в совместную работу железобетонной обвязочной балкой. Длина анкерной сваи – 7,0 м, шаг анкерных свай – 2,0 м, угол наклона к горизонту – 45 градусов. Элементы армируются металлическими трубами диаметром 89х6,5 мм.

В основании фундаментной плиты здания располагаются грунты с низкими ($E = 4,0 - 8,0$ МПа) и самое главное неоднородными деформационными характеристиками. Использование таких грунтов в качестве основания приводит к развитию неравномерных деформаций по пятну застройки, что в свою очередь отражается на увеличении конструктивных размеров и армировании основных несущих элементов здания.

Для улучшения и выравнивания прочностных и деформационных характеристик основания выполнено искусственное основание – геомассив, представляющий собой природный грунт, армированный жесткими грунтоцементными элементами (ГЦЭ), и распределительную подушку из уплотненного щебня фракции 40 – 70 мм, толщиной 500 мм. Требуемый модуль деформации геомассива E_{gm} – не менее 40 МПа; мощность геомассива ниже подошвы щебенистой подушки: под жилым домом – 12,5 м, под стоянкой – 10,0 м.

Геомассив выполняется путем равномерного армирования природного грунта жесткими грунтоцементными элементами (ГЦЭ). Грунтоцементные элементы работают в едином массиве с окружающим грунтом под всей подошвой плиты и не рассматриваются как свайный элемент, передающий острием нагрузку на нижележащие слои. Диаметр элемента – 1,2 м (рис. 4), расположение в плане – по сетке 2,6х2,6 м (рис. 5).

Приведенный модуль деформаций искусственного основания («геомассива») в таком случае определяется по «методу смеси» на основе теории композитных материалов. Расчет приведенного модуля деформации выполняется по формуле

$$E_{гр}^{экр} = \left[\frac{E_{гр} (A_{гр} - \sum A_{арм}) + E_{арм} \sum A_{арм}}{A_{гр}} \right] \quad (1)$$

В качестве матрицы рассматривается естественный грунт с его природными характеристиками; жесткостные характеристики и геометрические размеры грунтоцементных армирующих элементов определяются опытным путем. Аналогичный подход реализован д.т.н. В.В. Лушниковым при рассмотрении взаимодействия массивов грунта с буринъекционными сваями. В период производства работ велся постоянный контроль качества закрепления грунтов. Сплошность массива контролировалась контрольным бурением с отбором кернов (рис. 6). Образцы закрепленного грунта испытывались независимой лабораторией Горного института Уральского отделения РАН по стандартной методике определения предела прочности и модуля деформации материала. По результатам испытаний прочность на сжатие образцов составляет $R_{сж} = 3,5 - 4,5$ МПа, модуль общих деформаций $E = 2,5 - 3,0$ ГПа, что подтверждает проектные данные.

Для определения фактического модуля деформации искусственно улучшенного основания фундаментной плиты были выполнены натурные штамповые испытания по специально разработанной программе (рис. 7). Испытание проводилось согласно ГОСТ 20276-99 «Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости».

В качестве системы нагружения был использован железобетонный круглый штамп диаметром 112,8 см, площадью 10000 см², 100-тонный гидравлический домкрат и реактивная нагрузочная платформа весом 50 тонн. Перемещения штампа фиксировались с помощью прогибомеров 6ПАО. Модуль общих деформаций грунта определялся в интервале 0,15 – 0,25 МПа и 0,15 – 0,4 МПа. Нагрузку на штамп увеличивали ступенями давлений $\Delta p = 0,05$ МПа (0,5 кгс/см²), предельное давление на основание $p = 0,40$ МПа (4,0 кг/см²).

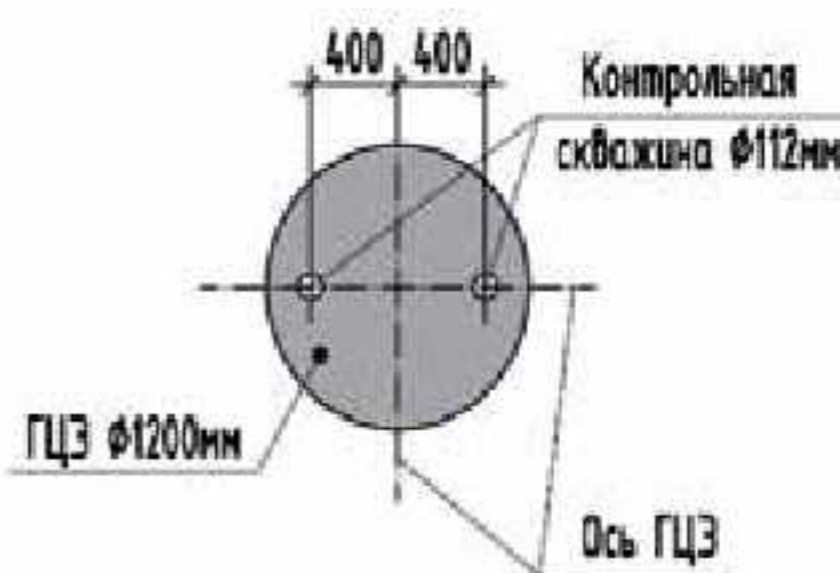


Рис. 6. Схема отбора кернов при контрольном бурении

Каждую ступень давления выдерживали до условной стабилизации деформации грунта (осадки штампа). За критерий условной стабилизации деформации принималась скорость осадки штампа, не превышающую 0,1 мм за время t , равное 2 часам. График штамповых испытаний представлены на рис. 8.

Модуль деформации грунта E , МПа, вычислялся для линейного участка графика по формуле

$$E = (1 - \nu^2) \cdot K_p \cdot K_1 \cdot D \frac{\Delta p}{\Delta S}, \quad (2)$$

где величина коэффициента Пуассона ν принята равной 0,35, как для глинистых грунтов.

По результатам штамповых испытаний были получены следующие значения модуля деформации основания: $E_1 = 97,8$ МПа в интервале давлений 0,15 – 0,25 МПа (это величины расчетных давлений под фундаментной плитой); $E_2 = 61,8$ МПа в интервале давлений 0,15 – 0,35 МПа (для определения общей картины нагружения грунта).

Проведенные испытания показали, что требуемый проектный модуль деформации грунта обеспечен со значительным запасом прочности, и фактическое его значение выше расчетного. Таким образом, применяемая методика теоретического вычисления приведенной характеристики себя оправдывает. Это подтверждают также наблюдения за развитием осадок строящихся зданий на искусственно улучшенном основании.

Был выполнен мониторинг за осадками строящегося в Перми 17-этажного жилого дома. По конструктивной схеме здание – рамно-связевое с полным железобетонным каркасом. Фундамент – железобетонная монолитная плита. Габаритные размеры плиты в плане – 50,4 x 22,1 м. Толщина плиты $H = 900$ мм.

Наблюдение за осадками данного здания проводилось, начиная с наиболее важного этапа строительства – появления нагрузок, больше половины проектных. Измерение осадки фундаментной плиты как единого целого относительно поверхности недеформируемого грунта производилось гидронивелиром для каждого момента времени, путем измерения смещения точки наблюдения относительно фиксированной внешней точки.

Здесь представлены результаты измерений пространственного распределения величин вертикальных осадок фундаментной плиты (рис. 9) на моменты наблюдений 14.12.2010 (начало наблюдений), 5.07.2011 (конец наблюдений).

За весь период наблюдений максимальная осадка фундаментной плиты относительно внешней неподвижной точки составила 3,85 см. Процесс осадки сооружения проис-



Рис. 7. Натурные штамповые испытания закрепленного грунта

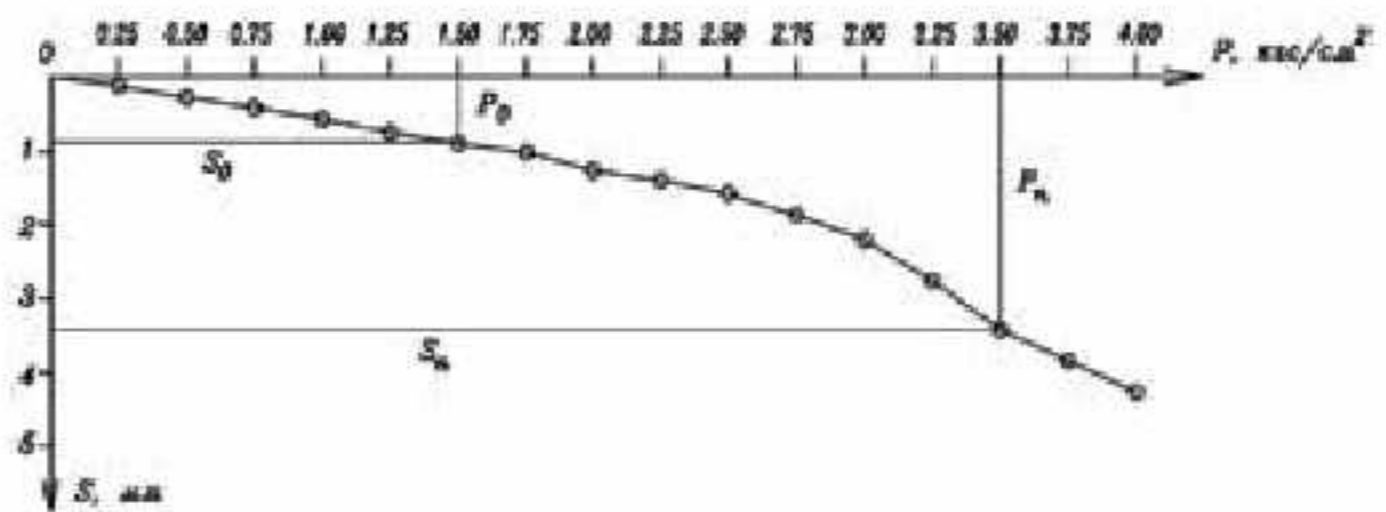


Рис. 8. График зависимости осадки от нагрузки $S = f(p)$

ходит равномерно, наблюдается смещение вниз всех точек фундамента практически на одну величину. В последних измерениях зарегистрирован процесс стабилизации осадок фундаментной плиты. Расчетная величина максимальной осадки фундаментной плиты, определенная с учетом моделирования основания в виде распределенного гомогенного материала – геомассива, с приведенным модулем деформации составила 4,52 см при $E = 40$ МПа, что на 17 % больше фактической; 4,32 см при $E = 60$ МПа, что на 12 % больше фактической. Это достаточно хорошая сходимость теоретических и экспериментальных данных показывает адекватность применяемой теоретической модели геомассива для описания технологии улучшения физико-механических свойств грунтов.

ВЫВОДЫ:

Опыт проведенных работ на объекте показывает, что применение струйной технологии закрепления слабых водонасыщенных грунтов позволяет успешно осваивать даже самые сложные площадки, надежно обеспечивать эксплуатацию здания при высоком уровне грунтовых вод и может быть использовано для дальнейшего внедрения при строительстве подземных частей комплексов жилых зданий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бройд, И.И. Струйная геотехнология: учебное пособие / И.И. Бройд. – М.: Издательство ассоциации строительных вузов, 2004. – 448 с.
2. Джатимиров, Х.Ф. Опыт усиления основания сооружения с помощью струйной технологии / Х.Ф. Джатимиров, А.А. Долев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2006. – №1. – С. 16 – 19.
3. Зега, С.О. Особенности проектирования грунтобетонных конструкций, сооружаемых с помощью струйной геотехнологии / С.О. Зега, И.И. Бройд // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2007. – №4. – С. 25 – 27.
4. Томаш Михальськи. Применение технологии JET GROUTING в целях обеспечения устойчивости стен глубоких котлованов / Томаш Михальськи // Будівельні конструкції: міжвід. наук.-техн. зб. – К.: НДІБК, 2007. – Вип. 66. – С. 158 – 168.
5. Cesare Melegari. Introduction to the jet grouting Methods / Cesare Melegari // Seminar on jet grouting Singapore, 1997.
6. Перельмутер, А.В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А.В. Перельмутер, В.И. Сливкер. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 600 с.