

Разработка численной модели прогноза деформаций земной поверхности на примере станции метрополитена глубокого заложения «Обводный канал» Беляков Н. А.¹, Карасев М. А.²

¹Беляков Никита Андреевич / Belakov Nikita Andreevich – доцент;

²Карасев Максим Анатольевич / Karasev Maxim Anatolievich – доцент,
кафедра строительства горных предприятий и подземных сооружений,
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург

Аннотация: работа посвящена вопросам прогноза деформаций земной поверхности при строительстве сложных пространственных подземных сооружений в условиях плотной городской застройки. Рассмотрены вопросы подготовки численной модели прогноза деформаций земной поверхности. Выполнен прогноз деформаций земной поверхности при сооружении станции метрополитена «Обводный канал». Представлено сравнение натурных замеров вертикальных перемещений земной поверхности и результатов численного моделирования.

Ключевые слова: оседание земной поверхности, станция метрополитена, численное моделирование, строительство тоннелей.

Развитие крупных городов непосредственно связано с комплексным освоением подземного пространства. Это объекты метрополитена, транспортные и сервисные тоннели, подземные склады и хранилища, объекты инфраструктуры, магазины и т.д. Строительство любых подземных сооружений приводит к изменению напряженного состояния вмещающего массива, сопровождающегося его деформациями, которые распространяются до земной поверхности, и это может оказывать негативное воздействие на здания и объекты инфраструктуры, расположенные на ней [1, 2, 3]. Сами же подземные сооружения по технико-экономическим соображениям обычно стремятся располагать на незначительной глубине от земной поверхности, что только увеличивает степень их влияния на объекты городской инфраструктуры.

Вместе с тем известно, что не всегда строительство подземных сооружений приводит к проявлению негативных последствий, выраженных в виде повреждений отдельных элементов зданий или сооружений на поверхности, а также, что при необходимости влияние подземного строительства можно нивелировать за счет применения различных мер защиты или изменения технологического режима. Конечное инженерное решение должно базироваться на прогнозных величинах деформаций земной поверхности и породного массива, вызванных строительством подземного сооружения.

Станция Санкт-Петербургского метрополитена «Обводный канал» является станцией пилонного типа, строительство которой было завершено в 2010 г. Станция расположена на глубине 65 м от земной поверхности в твердых аргиллитоподобных глинах. Мощность твердых глин над сводом станции 22 м, выше расположены четвертичные отложения, представленные супесями, суглинками и водонасыщенными песками. Протяженность станции 156 м. Станция состоит из трех параллельно расположенных тоннелей кругового очертания диаметром 9,5 м каждый. Тоннели соединяются между собой через проемы, ширина которых составляет 3,6 м. Примыкание эскалаторного тоннеля и подземного зала эскалаторного тоннеля к станции метрополитена выполнено со стороны бокового станционного тоннеля. Строительство станции выполнялось горным способом с поэтапным раскрытием сечения тоннелей заходками по 0,75 м. Крепление тоннелей выполнялось с помощью железобетонной тубинговой обделки толщиной 0,4 м с отставанием установки от лба забоя на 1,15 м. За момент ввода обделки в работу принимался момент выполнения тампонажа пространства между обделкой и породным контуром. Тампонаж осуществлялся в четвертое кольцо от лба забоя тоннеля. Обеспечение устойчивости лба забоя осуществлялось с применением горизонтально расположенных расстрелов. Строительство элементов станции выполнялось последовательно. Сначала выполнялось сооружение первого и второго боковых станционных тоннелей. Затем выполнялось сооружение центрального станционного тоннеля, а после этого - раскрытие проемов. Участок примыкания вестибюля эскалаторного тоннеля и вспомогательные тоннели сооружались в последнюю очередь.

Прогноз деформаций земной поверхности от строительства станции метрополитена «Обводный канал» выполнялся согласно следующей последовательности. На первом этапе численное моделирование выполнялось с целью прогноза смещений породного контура станционных тоннелей и участка примыкания эскалаторного тоннеля к станционным тоннелям. На втором этапе полученные на первом этапе величины деформаций породного контура тоннелей прикладывались в виде вынужденных смещений к контуру подземных сооружений, что позволяло выполнить прогноз распространения деформаций от станции метрополитена до земной поверхности. Геометрическое представление пространственной численной модели станционного комплекса «Обводный канал», соответствующей второму этапу, приведено на рисунке 1.

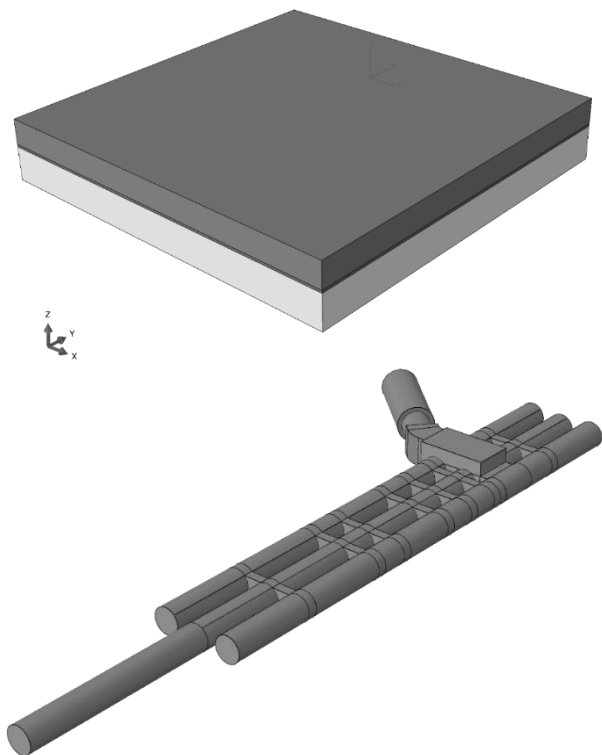


Рис. 1 – Геометрическое представление численной модели сооружения станции метрополитена «Обводный канал»

При выполнении численного моделирования сооружения станции метрополитена для описания слабых грунтов и глин переходного слоя принята упругопластическая модель, основанная на критерии прочности Кулона-Мора. Для описания твердых аргиллитоподобных грунтов принята нелинейно-упругая модель трансверсально-изотропной среды [4]. Физико-механические свойства слабых грунтов и глин переходного слоя сведены в таблице 1, а твердых аргиллитоподобных глин - в таблице 2.

Прогноз смещений контура станционных тоннелей, выполняемый на локальных моделях, позволил получить следующие результаты. Величина радиальных смещений в своде центрального станционного тоннеля после завершения его строительства получена равной 96 мм, в боковых станционных тоннелях 78 и 84 мм соответственно. Соотношение между смещениями в почве и своде станционных тоннелей приблизительно равно 0,5, в боках и своде - 0,75. Это достаточно хорошо согласуется с результатами натурных наблюдений.

По результатам численного моделирования, выполненного на основе разработанной глобальной модели, был выполнен прогноз оседания земной поверхности и построена муфта сдвига земной поверхности.

Таблица 1 – Расчетные показатели механических свойств грунтов слабых грунтов и глин переходного слоя

Наименование породы	γ , кН/м ³	E_0 , МПа	ν	c , кПа	φ , град
Слабые грунты	20	12	0.3	15	20
Глины переходного слоя	21	60	0.4	100	22

Примечание: γ - удельный вес пород; E_0 – модуль деформации; ν – коэффициент поперечной деформации; c – сцепление; φ - угол внутреннего трения.

Таблица 2 – Расчетные показатели механических свойств твердых аргиллитоподобных глин

Наименование породы	γ , кН/м ³	E^{ref} , МПа	G_0^{ref}	E_{sur} , МПа	ν	m	α	a	γ_{07}	c , кПа	φ , град
Твердые аргиллитоподобные глины	22	100	350	150	0.35	0.75	1.48	0.385	0.000035	150	23

Примечание: γ - удельный вес пород; E^{ref} - модуль деформации породы за пределами диапазона малых деформаций; G_0^{ref} - модуль сдвига породы за пределами диапазона малых деформаций; ν - коэффициент поперечной деформации; m - показатель, учитывающий влияние минимальных главных напряжений на деформационные свойства породы; α - показатель анизотропии деформационных свойств; a - показатель формы кривой изменения модуля сдвига в диапазоне от очень малых до малых деформаций; γ_{07} - деформации сдвига соответствующие моменту снижения начального модуля сдвига на 30%; c - сцепление; φ - угол внутреннего трения.

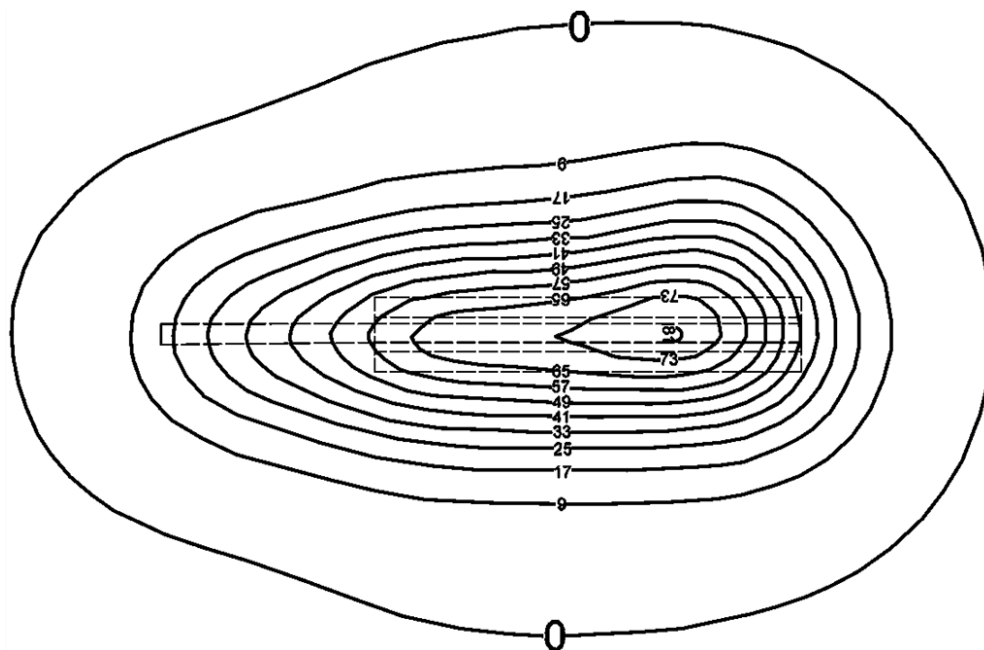


Рис. 2 – Мульда оседания земной поверхности по результатам численного моделирования (станция метрополитена «Обводный канал»), мм

Из представленной на рисунке 2 мульды видно, что максимальная осадка земной поверхности сконцентрировалась над участком сопряжения эскалаторного тоннеля со станцией метрополитена. Величина осадки на поверхности достигает 81 мм. В торцевых частях станции осадка поверхности не превышает 60 мм. Качественно параметры мульды оседания соответствуют степени воздействия при строительстве элементов станции метрополитена, а мульда сдвижения достигает наибольшей ширины в центральной части станции и сужается по мере продвижения в торцевую часть станции.

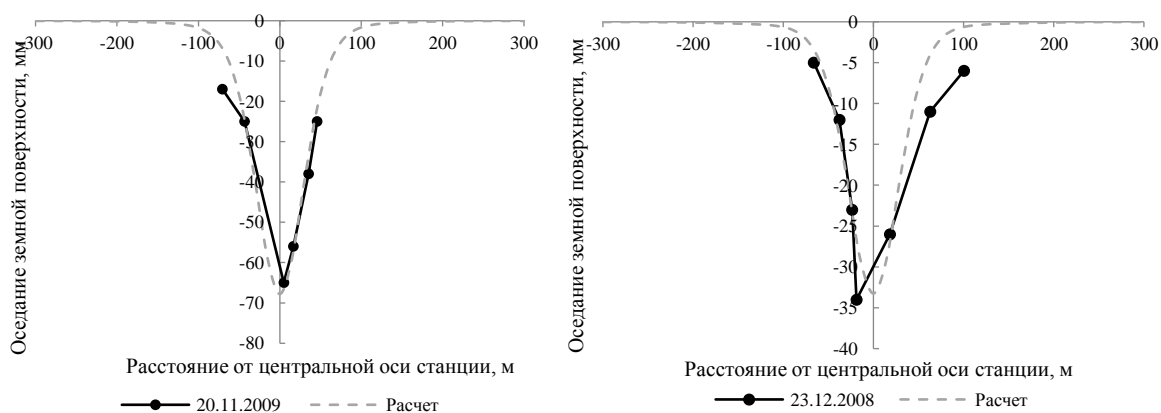


Рис. 3 – Сравнение замеренных и прогнозных величин вертикальных смещений земной поверхности по характерным профилям

Сравнение замеренных при выполнении мониторинга величин оседания земной поверхности и прогнозных величин позволяет говорить о хорошей сходимости. Так, по характерным профилям (рисунок 3) разница между максимальными прогнозными и замеренными смещениями составила не более 4 %, что составляет несколько миллиметров в абсолютном выражении. Данное обстоятельство позволяет судить о достоверности прогноза деформаций земной поверхности по предложенной методике.

Литература

1. *Лиманов Ю. А.* Осадки земной поверхности при сооружении тоннелей в кембрийских глинах. ЛИИЖТ. Л., 1957. 239 с.
2. *Подаков В. Ф.* Исследования деформации земной поверхности на трассе Московско-Петроградского направления. Ж. Метрострой № 3-4, 1963.
3. *Хуцкий В. П.* Расчёт оседаний земной поверхности во времени при сооружении станций метрополитена в Петербурге. / Маркшейдерское дело и геодезия. / Межвузовский сборник научных трудов. СПбГИ. 1999. С.39-42.
4. *Карасев М. А.* Разработка нелинейно-упругой трансверсально-изотропной модели среды. Проблемы геомеханики, геотехнологии и маркшейдерского дела. Записки Горного института. Том 198. СПб. 2012 г., стр. 202-206.