УДК 622.284

М.Г.ПОПОВ, *канд. техн. наук, ассистент, mice8@yandex.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург
С.В.СТЕПАНЕНКО, *начальник ПТО*
ООО «Струйные Технологии и Строительство», Санкт-Петербург

M.G.POPOV, *PhD in eng. sc., assistant lecturer, mice8@yandex.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg
S.V.STEPANENKO, *head of department*
Jet Technology and Construction ltd, Saint Petersburg

МЕТОДИКА ПРОГНОЗА СМЕЩЕНИЙ ГРУНТОВОГО МАССИВА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПОДЗЕМНОГО СООРУЖЕНИЯ ПОД ЗАЩИТОЙ ОГРАЖДАЮЩЕЙ СТЕНЫ

Разработана численная модель и проведено математическое моделирование процесса сооружения котлована под защитой стены из буросекущихся свай. Представлены результаты математического моделирования по горизонтальным смещениям стены котлована. Изложены условия строительства котлована и основные технологические решения.

Ключевые слова: моделирование, грунтовый массив, котлован, метод конечных элементов, свая.

BUILDING OF UNDERGROUND CONSTRUCTION PROTECTED ENCLOSING WALL AND METHOD OF DISPLACEMENT FORECAST OF THE SOIL

The volumetric model taking and performed mathematical modeling the process of construction of the pit under the enclosing wall of secant piles. The results of mathematical modeling on the horizontal displacements of the pit wall. Set out conditions for the construction of the pit and the main technological solutions.

Key words: modeling, soil, pit, finite elements method, the pile.

Инженерно-геологические условия строительства насосной станции первого подъема весьма сложные. Массив до глубины 25 м представлен водонасыщенными песками разной крупности с нарушенным природным сложением. В период проведения буровых работ уровень грунтовых вод был зафиксирован на глубине 2,5 м. Положение среднегодового уровня предполагается на глубине порядка 2,6 м.

До начала земляных работ сооружаются стены котлована из буросекущих свай диаметром 1500 мм по замкнутому периметру (рис.1).

План и основные размеры ограждения котлована из буросекущих свай представлены на рис.1. Котлован по замкнутому периметру оборудуется бетонными блоками ФБС 9.6.6-Т.

После сооружения буросекущих свай начинается разработка грунта котлована, состоящая из нескольких стадий. На стадии I грунт котлована разрабатывается краном КС-5363, оборудованным грейфером на глубину 1600 мм до отметки 2,150 с доработкой по углам котлована вручную. Разработанный грунт грузится в автосамосвалы и вывозится в отвал. Затем выставляется опалубка и бе-

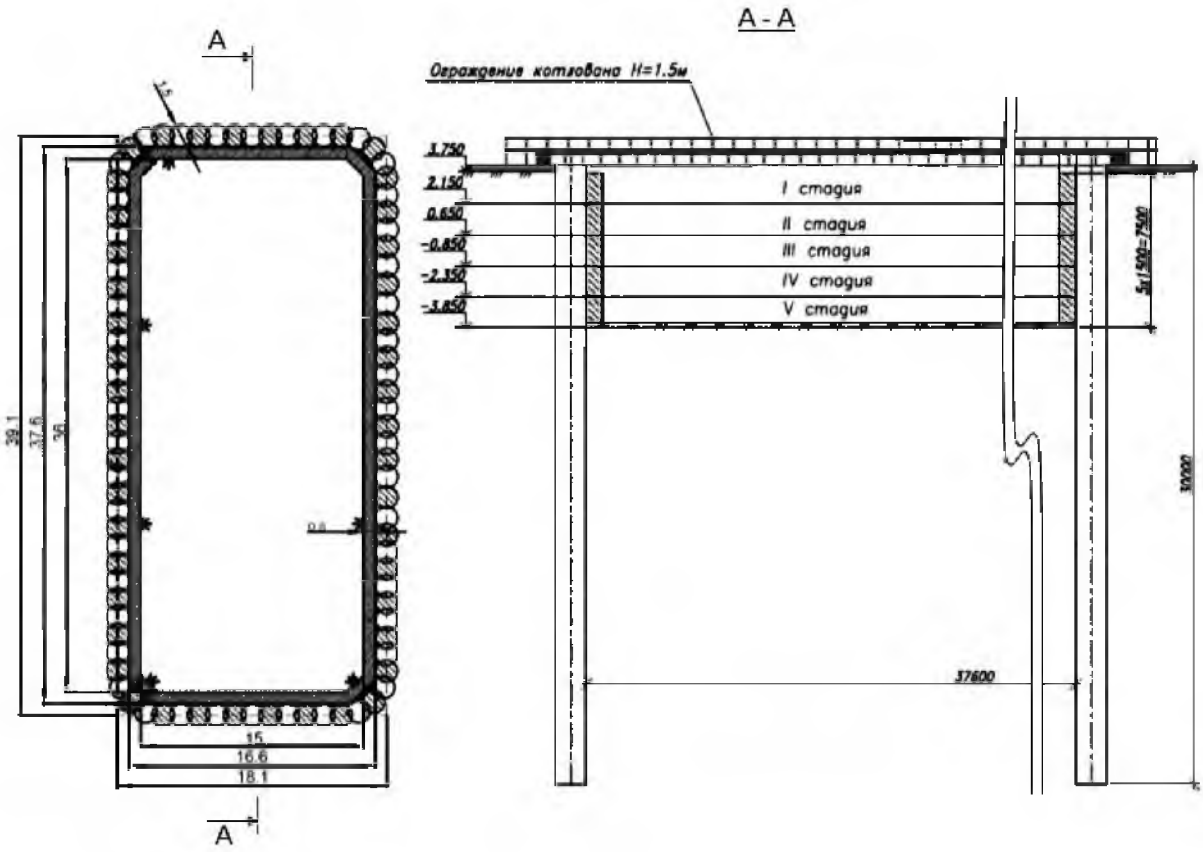


Рис.1. Котлован с ограждением из буросекущих свай

тонируются железобетонные стены. Аналогичным образом производится разработка котлована на последующих стадиях до отметки –3,65.

При строительстве данного подземного сооружения предусмотрено использование ряда современных технологий строительства и технических решений, направленных на обеспечение прочности и устойчивости основных несущих конструкций. При решении подобных задач рациональным видится использование метода конечных элементов. Ниже приводится расчет взаимодействия основания и конструкций ограждения котлована.

Численное моделирование сооружения насосной камеры под защитой ограждающей стены рассматривалась в пространственной постановке. Несмотря на то, что длина камеры больше ее ширины, справедливо говорить о плоскодеформационной постановке лишь с некоторым допущением. Фактором, который вводит дополнительные допущения при решении задачи в плоскодеформационной постановке, является устройство железобетонной рубашки по периметру насосной камеры. Опирание рубашки осуществляется только в краевых зонах, что в явном виде учесть при моделировании в плоскодеформационной постановке невозможно, а косвенные методы трудоемки и предполагают множество допущений.

Насосная камера в сечении представляет собой прямоугольник со скругленными гранями. Такая форма поперечного сечения насосной камеры не позволяет говорить о ее работе как круглого сечения или даже вытянутого эллипса. Скругленные углы снижают концентрации напряжений в этих зонах, но не оказывают значительного влияния на характер работы всей конструкции в целом. В процессе численного моделирования сечение котлована заменялось прямоугольным без скругления углов, что позволило понизить размерность задачи и не снижало достоверности получаемых ре-

Физико-механические свойства грунтов, принятые для расчета

Наименование грунта	Мощность слоя h, м	Коэффициент пористости e	Объемный вес в насыщенном водой состоянии γ, кН/м^3	Объемный вес в ненасыщенном водой состоянии γ', кН/м^3	Модуль деформации грунта E_0, МПа	Коэффициент поперечной деформации ν	Угол внутреннего трения φ	Сцепление c, кПа
Пески мелкие и средней крупности	23.5	0,7	15,4	19,5	20	0,3	25	1
Пески пылеватые	2	0,55	16,65	20,2	18	0,3	33	1
Супеси пылеватые тугопластичные	4,5	0,43	21,45	21,5	10	0,2	16	22
Супеси пылеватые, с гравием, галькой, пластичные, полутвердые	2,5	0,42	18,8	21,8	15	0,2	20	13
Супеси очень пылеватые (алевритовые), пластичные, полутвердые	–	0,59	16,7	20,4	12	0,2	17	17

зультатов, так как угловые участки не являлись зонами интересов.

Численное моделирование сооружения насосной станции осуществлялась в следующей последовательности: формирование начального равновесного состояния в грунтовом массиве; установка стены из буросекущихся свай.

Грунт разрабатывается в котловане под защитой стены из буросекущихся свай и с устройство железобетонной рубашки котлована.

Для рассматриваемых инженерно-геологических условий напряжения, действующие в грунтовом массиве, можно разделить на эффективные σ' и поровое давление u, при этом полное значение действующих напряжений σ определяется согласно следующему принципу

$$\sigma = \sigma' + u. \qquad (1)$$

Коэффициент бокового давления для несвязных и слабосвязных грунтовых массивов, не подвергнутых переуплотнению, можно приближенно оценить по зависимости

$$\lambda = 1 - \sin(\varphi). \qquad (2)$$

Исходные данные (см.таблицу) о работе грунтов позволяют рассматривать грунтовый массив как упруго-пластическую среду, прочность которой задается критерием прочности Кулона – Мора.

Необходимо отметить, что упруго-идеально пластическая среда не позволяет описать сложный характер поведения слабых грунтов. Более полно поведение мягких грунтов можно описать с применением упруго-пластических или упруго-вязко-пластических моделей с введением упрочнения. Но для эффективного применения параметры этих моделей должны определяться на основании трехосных, компрессионных и длительных (реологических) испытаний*.

Диаметр составляющих элементов ограждающей стены из буросекущихся свай по проекту принят равным 1,5 м. При этом эффективная толщина такой стены составляет 0,9 м. При расчете жесткости стены из буросекущихся свай принималась эффективная толщина стены. Расчет веса стены из буросекущихся свай выполнялся с учетом ее полного сечения.

---

* Геотехническое сопровождение развития городов / В.М.Улицкий, А.Г.Шашкин, К.Г.Шашкин. СПб, 2010.

Geotechnical support for urban development / V.M.Ulitsky, A.G.Shashkin, K.G.Shashkin. Saint Petersburg, 2010.

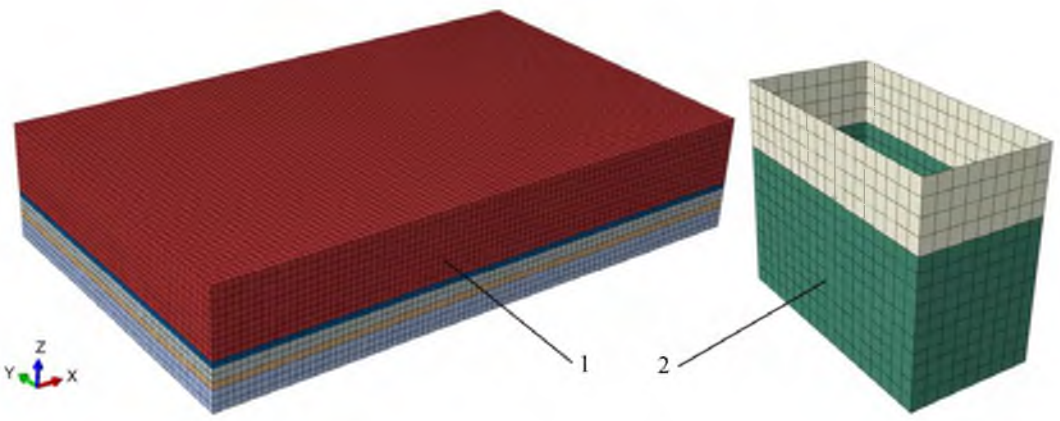
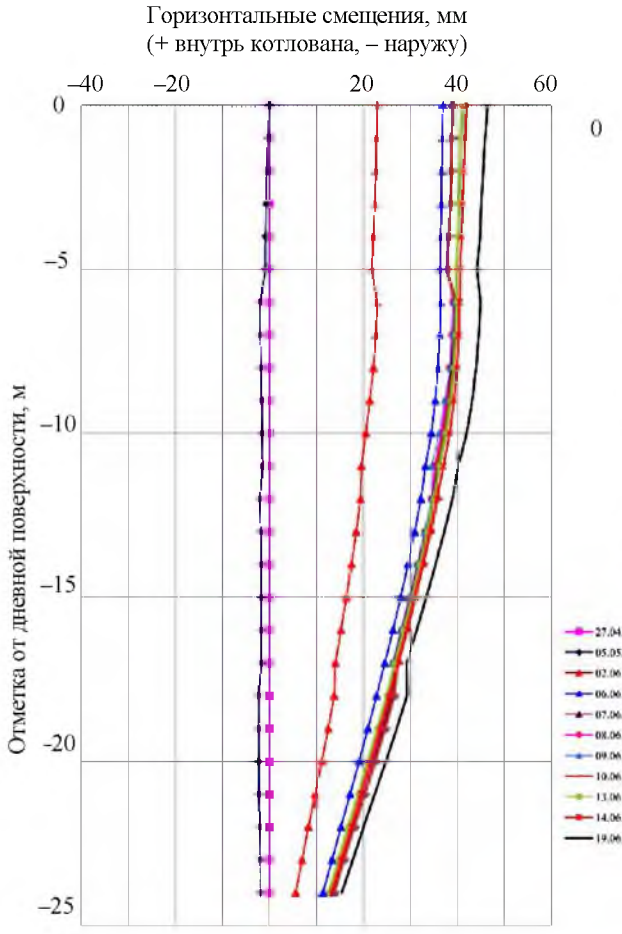


Рис.2. Конечно-элементная модель грунтового массива и несущих элементов насосной станции

1 – модель грунтового массива; 2 – модель стены из буросекущихся свай и железобетонной рубашки; цветом выделены слои грунтов с различными физико-механическими показателями

а



б

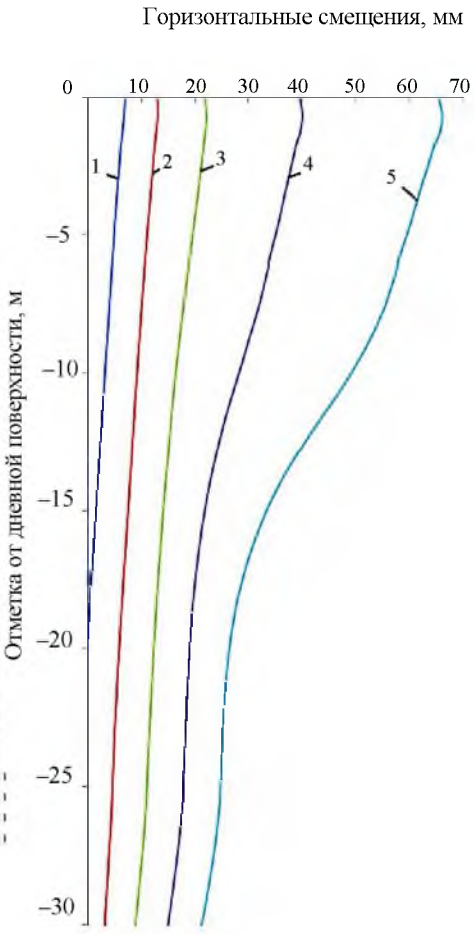


Рис.3. Развитие горизонтальных смещений ограждающей стены из буросекущихся свай во времени: *а* – результаты геотехнического мониторинга (инклинометрическая трубка 3); *б* – результаты численного моделирования

1-5 – этапы разработки грунта в котловане

Разработка грунта в котловане осуществляется заходками и разделена на 5 стадий: 1 – глубина заходки 1,6 м; 2-5– глубина заходки 1,5 м.

Конечно-элементная модель грунтового массива и несущих элементов насосной станции представлена на рис.2.

Результаты численного моделирования оценивались по величинам горизонтальных смещений стены из буросекущихся свай по ее длине в среднем сечении по длинной стороне котлована.

Усиление котлована расстрелом при строительстве насосной камеры под защитой стены из буросекущихся свай и железобетонной рубашки в данной схеме не рассматривалось.

Сравнивая результаты численного моделирования с результатами геотехнического мониторинга (рис.3, *а*), можно отметить хорошую сходимость результатов по величине максимальных смещений, при этом качественно зависимости горизонтальных смещений по глубине (середина длинной части стены насосной камеры) (рис.3, *б*)

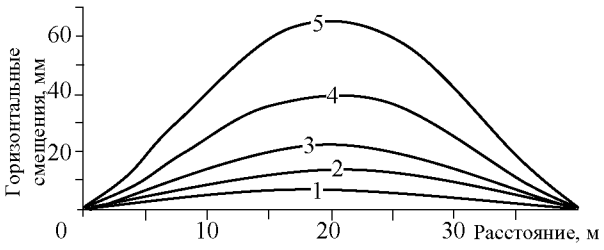


Рис.4. Горизонтальные смещения стены из буросекущихся свай по длине стены (на уровне поверхности земли)

1-5 – этапы

имеют незначительное отличие друг от друга. По длине насосной станции горизонтальные смещения (рис.4), качественно совпадают с результатами геотехнического мониторинга.

Максимальные горизонтальные смещения реализуются в середине пролета стены на уровне поверхности земли и достигают значения 65 мм, у конца свай они минимальны и составляют 15-25 мм. По результатам геотехнического мониторинга можно наблюдать такую же картину, что свидетельствует о правильности выбранной методики расчета.