УДК 622.284

Д.А.ПОТЕМКИН, *канд. техн. наук, доцент, (812) 328-86-25*
П.А.ДЕМЕНКОВ, *канд. техн. наук, доцент, dem-petr@yandex.ru, (812) 328-86-25*
В.Н.ОЧНЕВ, *канд. техн. наук, доцент, (812) 328-86-25*
А.Д.КУРАНОВ, *аспирант, kuranov555@mail.ru, (812) 328-86-25*

D.A.POTYOMKIN, *PhD in eng. sc., associate professor, (812) 328-86-25*
P.A.DEMENKOV, *PhD in eng. sc., associate professor, dem-petr@yandex.ru, (812) 328-86-25*
V.N.OCHNEV, *PhD in eng. sc., associate professor, (812) 328-86-25*
A.D.KURANOV, *post-graduate student, kuranov555@mail.ru, (812) 328-86-25*

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СИСТЕМЫ «ГРУНТ – СВАЙНЫЕ ФУНДАМЕНТЫ» НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ ВОЗВЕДЕНИЯ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ

Выполнено численное моделирование методом конечных элементов двух вариантов свайных фундаментов для высотного здания. Задача решалась в объемной постановке с учетом этапности приложения нагрузок. По результатам расчетов построены эпюры изменения вертикальных перемещений на различных этапах строительства. Выполнен анализ мульды оседания.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, фундаменты, высотные здания, мульда оседания, метод конечных элементов.

STRESS AND STRAIN STATE OF «SOIL – PILE FOUNDATIONS» FOR VARIOS STAGES OF HIGH-RISE BUILDING CONSTRUCTION

Finite element analysis of soil – pile interaction for two different design schemes is done. 3d analysis and stage construction is considered. As the results of FEA modeling vertical displacement of soil and subsidence trough for different stage of construction are drawn and analyzed.

Key words: stress, strain, foundations, high-rise buildings, subsidence trough, finite element method.

Исходные данные к моделированию напряженно-деформированного состояния грунтового массива, вмещающего фундамент высотного здания: высота здания 75 м; размеры в плане 48×56 м; высота этажа 3,5 м; подземная часть здания 4 м (до отметки подошвы фундамента). Сетка колонн 6,8×6,8 м. Здание каркасное, из монолитного железобетона. Стены здания самонесущие, условная толщина 0,64 м; объемный вес 13 кН/м^3. Перегородки – средняя нагрузка по площади на перекрытие 1,5 кПа.

Число перекрытий в здании 22, число покрытий 1. Суммарная нагрузка от перекрытий и покрытий: нормативная 202 кПа, расчетная 253 кПа. Нагрузка от колонн при размерах поперечного сечения 0,6×0,6 м составит: нормативная 490 кН, расчетная 585 кН. Нагрузка от стен: нормативная 312 кН/м, расчетная 370 кН/м. Нагрузка от сплошной фундаментной плиты: нормативная 25 кПа, расчетная 30 кПа.

В работе рассмотрены два типа фундаментов: сплошная жесткая плита на сваях, свайный фундамент с кустовым расположением свай в ростверках под каждой колонной здания.

Нагрузки на основание здания для плитно-свайного фундамента складываются из собственного веса перекрытий, по-

крытия, колонн, стен и веса фундаментной плиты: нормативная нагрузка 264 кПа, расчетная нагрузка 320 кПа. Нагрузки на ростверки для кустового свайного фундамента: для средних осей нормативная нагрузка 9830 кН, расчетная 12280 кН; для крайних осей нормативная нагрузка 7280 кН, расчетная 8950 кН; для угловых ростверков нормативная нагрузка 4950 кН, расчетная 6020 кН.

Количество свай в ростверках принято, исходя из фактической несущей способности одной сваи, 2500-3000 кН. Для плитно-свайного фундамента общее количество свай составило 378 штук, свайное поле распределено по сетке 18×21. Для кустового свайного фундамента принято следующее количество свай в кусте: угловые кусты – 3 сваи, крайние оси – 4 сваи, средние (от наиболее нагруженных колонн) оси – 5 свай.

Общий вид пространственных моделей плитно-свайного и кустового фундаментов приведен на рис.1. На рис.2 приведены фрагменты пространственных конечно-элементных моделей грунтового массива, вмещающего оба рассматриваемых типа фундаментов.

Грунтовый массив в районе строительства представлен пятью разнотипными слоями: насыпным грунтом, суглинками текучими, текучепластичными и пластичными, а также полутвердыми и твердыми глинами. Мощность грунтовых слоев составляет соответственно: первый слой 2 м, второй – 7 м, третий – 11 м, четвертый – 8 м, пятый – 72 м (от кровли до нижней плоскости модели).

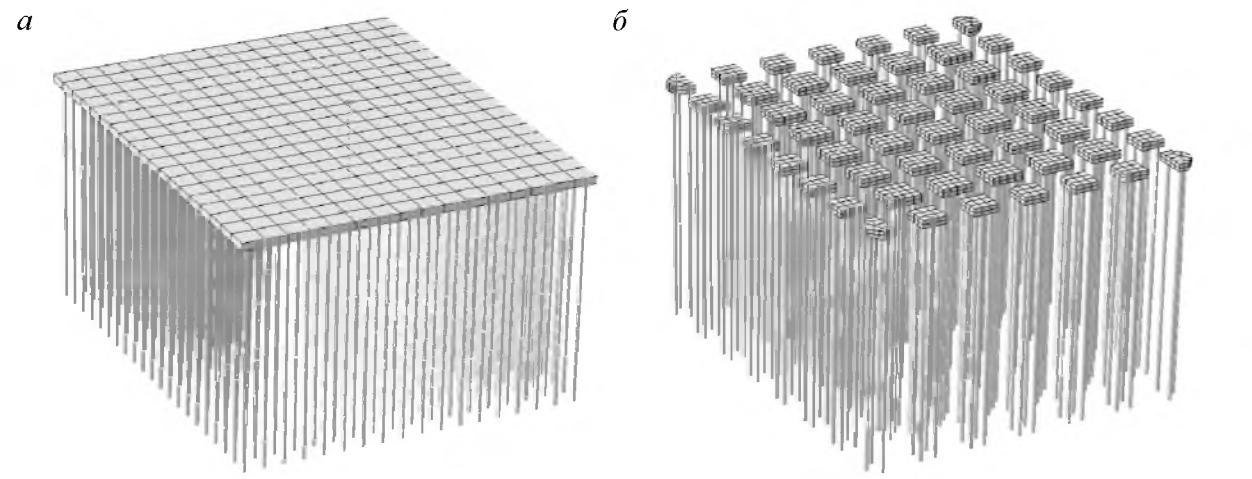


Рис.1. Общий вид моделей фундаментов: *а* – плитно-свайный; *б* – кустовой свайный

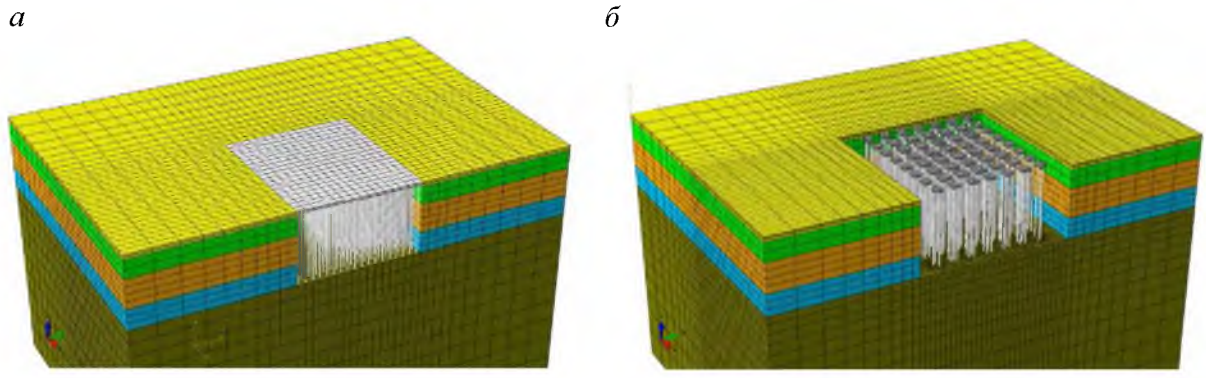


Рис. 2. Фрагмент конечно-элементных моделей грунтового массива: *а* – с плитно-свайным фундаментом; *б* – с кустовым свайным фундаментом

Свайные фундаменты многофункционального комплекса опираются на полутвердые глины, залегающие на глубине около 28 м (заглубление свай составляет 2-3 м). Общие размеры вмещающего вышеуказанные объекты грунтового массива составляют: 170×170 м в плане (по осям X и Z) и 100 м в глубину (по оси Y). Расчетные физико-механические характеристики грунтов основания приведены в табл.1.

Таблица 1

Расчетные характеристики материалов (грунтов)

Название	Расчетные значения физико-механических характеристик		
	Модуль общей деформации, МПа	Коэффициент Пуассона	Плотность, кг/м^3
Бетон фундамента (В30)	30000	0,20	2500
Грунт 1 (насыпной грунт)	5	0,49	1600
Грунт 2 (суглинки легкие текучие)	7,2	0,33	1920
Грунт 3 (суглинки легкие текучепластичные)	9,4	0,32	1940
Грунт 4 (супеси пылеватые пластичные)	13,9	0,31	2160
Грунт 5 (глины легкие полутвердые, твердые)	28,0	0,31	2020

Нагрузка на сваи фундаментов растет постепенно по мере возведения конструкций здания. В расчетах напряженно-деформированного состояния грунтового массива, включающего элементы фундаментов двух рассматриваемых типов, рассмотрены пять укрупненных технологических этапов. Этапы отражают последовательность возведения конструкций с постепенным, неравномерным нагружением фундаментов.

На рис.3 приведены схемы с указанием очередности появления нагрузок на фундамент и их значение. Численное значение нагрузок для плитно-свайного фундамента дано на 1 м^2 плиты, а для кустового свайного фундамента – на ростверк куста.

С целью качественной оценки деформированного состояния основания построены эпюры распределения вертикальных перемещений грунта основания по мере развития строительных работ по двум вертикальным сечениям, проходящим через оси фундамента – короткую (48 м) и длинную (56 м).

На первом расчетном этапе – возведение первых четырех этажей здания – перемещения грунта основания не превышают 2,5 мм. На втором расчетном этапе – возведение восьми этажей по правую сторону от короткой оси фундамента – перемещения грунта основания составляют 4,0 мм.

На третьем расчетном этапе – возведение двенадцати этажей по левую сторону от

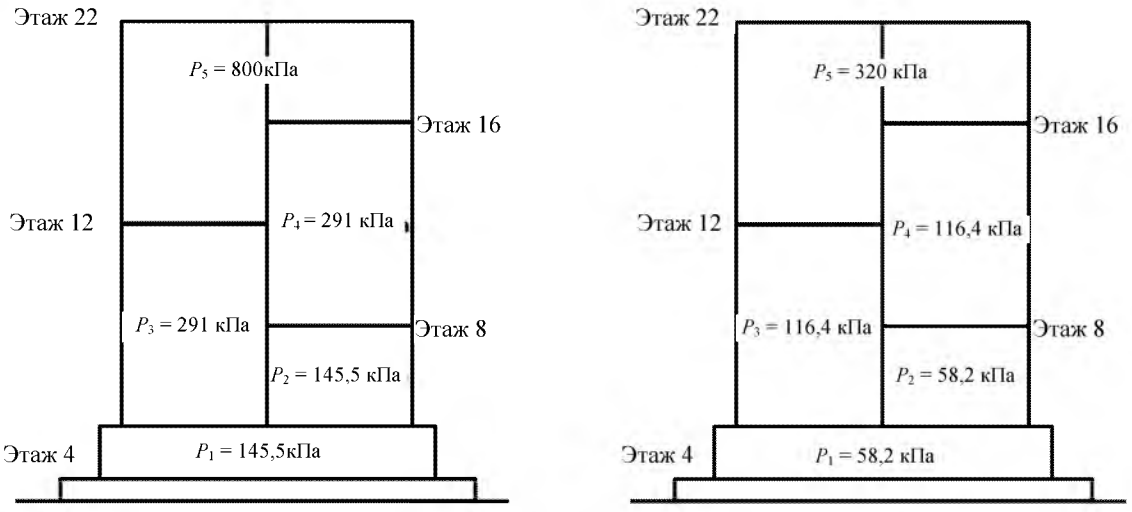


Рис.3. Схема технологических этапов и нагрузок на плитно-свайный фундамент (*а*); на кустовой свайный фундамент (*б*)

короткой оси фундамента – перемещения грунта основания не превышают 6,5 мм. На четвертом расчетном этапе – возведение шестнадцати этажей по правую сторону от короткой оси фундамента – перемещения грунта основания составляют 8,8 мм.

На заключительном пятом расчетном этапе – возведение двадцати двух этажей – перемещения грунта основания составляют 13,5 мм.

В направлении длинной оси фундамента заметна асимметрия распределения перемещений относительно центра фундамента. Это объясняется попеременным фланговым нагружением фундамента по мере развития строительных работ.

На рис.4 приведены эпюры вертикальных перемещений поверхности при поэтапном возведении здания на свайно-кустовом фундаменте.

Заметно увеличение вертикальных деформаций в сторону действующей увеличивающейся нагрузки, неравномерность осадки фундамента на рассматриваемых расчетных этапах указывает на возможную опасность потери устойчивости всего сооружения. В заданных условиях неравномерность деформаций не принимает критических значений, но ввиду значительных допущений, принятых при разработке геомеханической системы «грунт – свайные фундаменты» учет последовательности ведения работ и разработка их оптимального порядка становится существенным фактором в прогнозе напряженно-деформированного состояния грунтов оснований высотных зданий.

Моделирование работы плитно-свайного фундамента показало следующие результаты. На первом расчетном этапе – возведение первых четырех этажей здания – перемещения грунта основания не превышают 3 мм. На втором этапе – возведение восьми этажей по правую сторону от короткой оси фундамента – перемещения грунта основания составляют 4,4 мм. На третьем этапе – возведение двенадцати этажей по левую сторону от короткой оси фундамента – перемещения грунта основания не превышают 7 мм. На расчетном этапе – возведение шестнадцати этажей по правую сторону от короткой оси фундамента – перемещения грунта основания составляют 10 мм. На заключительном пятом расчетном этапе – возведение двадцати двух этажей – перемещения грунта основания составляют 15 мм. При рассмотрении перераспределений вертикальных перемещений в направлении длинной оси фундамента можно установить асимметричность картины распределения перемещений относительно центра фундамента.

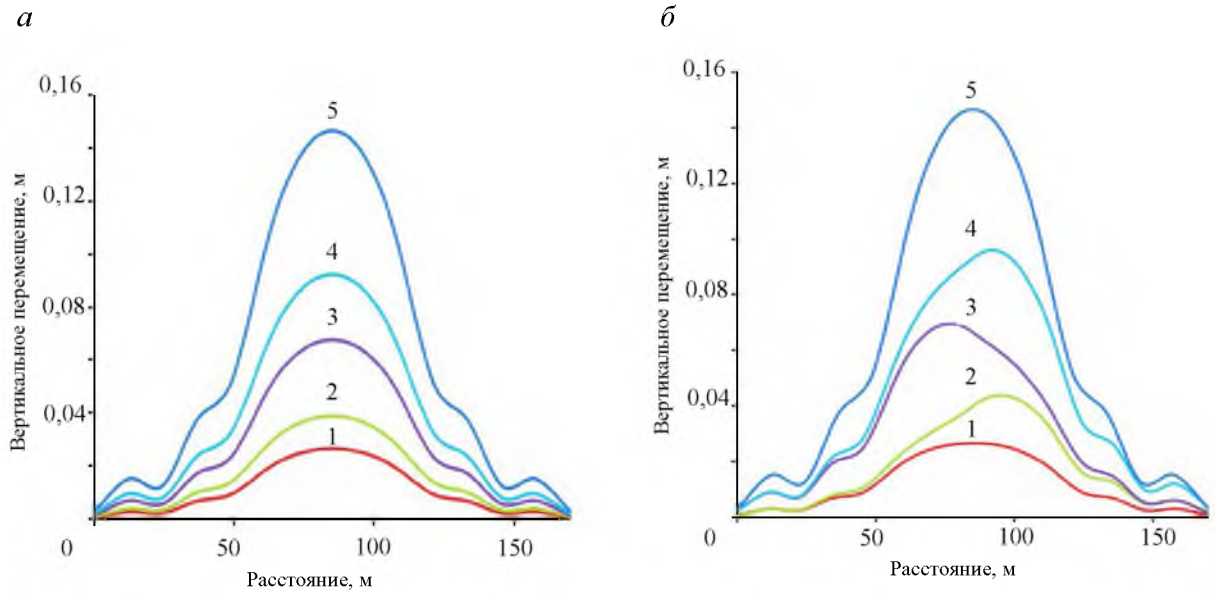


Рис.4. График изменения вертикальных перемещений в направлении короткой (*а*) и длинной осей (*б*) свайно-кустового фундамента по расчетным этапам (1-5)

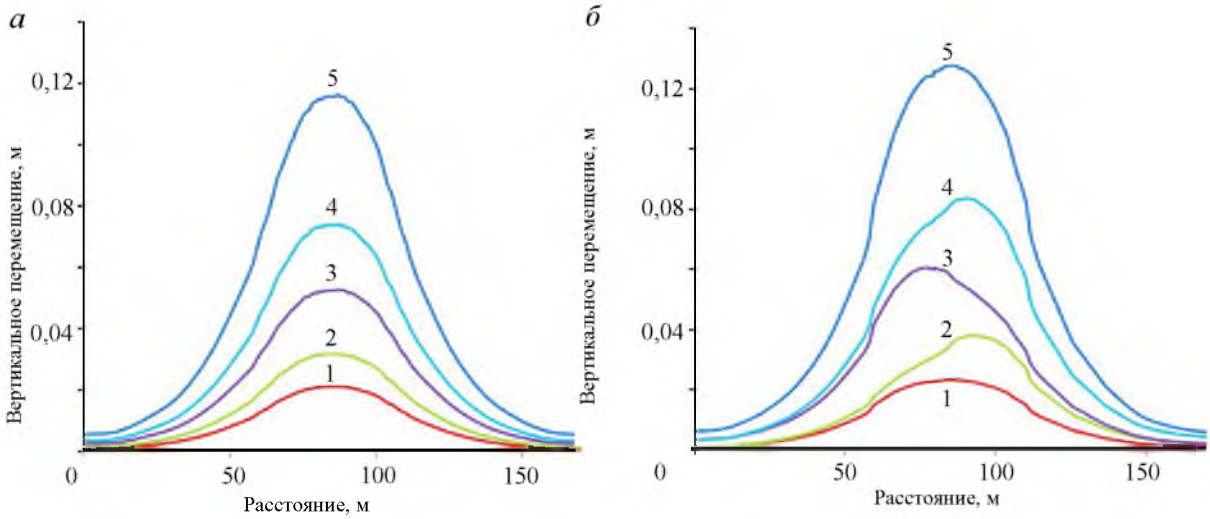


Рис.5. График изменения вертикальных перемещений в направлении короткой (*а*) и длинной осей (*б*) плитно-свайного фундамента по расчетным этапам (1-5)

На рис.5 приведены эпюры вертикальных перемещений поверхности при поэтапном возведении здания на плитно-свайном фундаменте.

По эпюрам можно судить об интенсивности снижения влияния здания на окружающий массив. Так, в точке, удаленной на 30 м от оси фундамента, величина максимальных деформаций снижается более, чем на 30 %, в точке, удаленной на 50 м, – на 75 %. Эпюры позволяют оценить влияние последовательности строительства здания на деформированное состояние основания. На расчетных этапах 2,3,4 четко прослеживается увеличение вертикальных деформаций в сторону действующей увеличивающейся нагрузки. Похожие результаты были получены и при расчетах других подземных и наземных объектов*.

Неравномерность осадки фундамента на рассматриваемых расчетных этапах указывает на потенциальную опасность потери устойчивости всего сооружения. Однако, сопоставляя результаты максимальных вертикальных деформаций свайно-кустового и плитно-свайного фундаментов, можно заключить, что на всех расчетных этапах деформации основания плитно-свайного фундамента на 5-15 % больше, чем деформации свайно-кустового фундамента.

Максимальная величина оседания в мульде может достигать 12-14 см; размеры мульды в плане (зона влияния здания на свайном фундаменте) достигают величины ширины (длины) здания в соответствующем направлении.

Геометрические характеристики объемов грунта, вовлеченного в движение работой обоих фундаментов, оказались примерно одинаковыми при некоторой разнице в абсолютных величинах смещений на разных этапах строительства.

---

* *Потемкин Д.А.* Моделирование напряженно-деформированного состояния грунтового массива, вмещающего комплекс элементов подземных и наземных сооружений / Д.А.Потемкин, П.А.Деменков // Известия Тульского государственного университета. Тула, 2008.

Potemkin D.A. Numerical modeling of stress and strain state of soil – structure interaction / D.A.Potemkin, P.A.Demenkov // Proceedings of Tula State University. Tula, 2008.

Потемкин Д.А. Напряженно-деформированное состояние обделок станционного комплекса метрополитена испытывающего влияние свайного фундамента / Д.А.Потемкин, П.А.Деменков, В.Н.Очнев // Записки Горного института. СПб, 2010. Т.185.

Potemkin D.A. The is intense-deformed condition construction the station complex of underground coming under influence pile base / D.A.Potemkin, P.A.Demenkov, V.N.Ochnev // The Proceedings of the Mining Institute. Saint-Petersburg, 2010. Vol.185.