

Технико-экономическое сравнение вариантов проектирования фундаментов на примере высотного строительства

Н.В. Шилин, В.В. Полити

Научно-исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация: При проектировании фундаментов высотных зданий следует учитывать технико-экономические особенности строительства и эксплуатации этих уникальных и технически сложных объектов. Среди особенностей выделяют способность экономить городское пространство, быть доминантами архитектуры города. Другие особенности заключаются в высокой зависимости от ветровых нагрузок, нагрузок от массы здания, а также в чувствительности к возникновению крена здания. При проектировании и расчетах фундаментов следует оценивать сложное взаимодействие огромной массы здания и массы грунтов, находящихся, как непосредственно под зданием, так и за пределами котлована. В данном исследовании проведен анализ основных технических факторов, влияющих на выбор фундамента. В аналитических целях приведен пример укрупненного метода учета ценовых факторов

Ключевые слова: высотные здания, технико-экономические особенности, свайный фундамент, плитный фундамент, свайно-плитный фундамент, ценовые факторы, экономичность

Высотное здание, как уникальное и технически сложное сооружение, требует и технически сложных расчетов и испытаний, в том числе, и испытаний будущей защитной оболочки здания, расчета и выбора конструкции фундаментов. Не вызывает сомнения и тот факт, что для получения точных и обоснованных расчетов требуются специалисты с большим опытом и высоким уровнем подготовки, также и дорогостоящие программные комплексы, например, инструменты моделирования потока. Однако, несмотря на высокую стоимость и техническую сложность, высотные здания уже давно проектируются и строятся во всем мире. Поэтому, далее рассмотрим градостроительные преимущества высотного строительства и особенности проектирования и расчетов строительных конструкций, отвечающих за безопасность самого здания и окружающей застройки [1,2].

Итак, одно из преимуществ высотного строительства кроется уже в самом названии: высотные здания используют вертикальное пространство,

что позволяет сэкономить территорию при сохранении большего количества полезной площади. Если в таких крупных городах, как Нью-Йорк, Шанхай или Токио высотные здания и сооружения строятся по экономическим причинам: очень высокая арендная плата земли, то, например, в России, Европе или Арабских эмиратах возникают причины немного другого характера – имидж, политический престиж, воплощение амбиций государств и их правителей.

Тем не менее, проблема занятости городского пространства в скором времени затронет, если уже не затронула самым прямым образом, все крупнейшие мегаполисы мира. И нехватка пространства скажется на всем городе самым негативным образом, а это только начало нарастания дефицита территории, жизнеобеспечивающих коммуникаций, электроэнергии, водоснабжения, и других ресурсов. Поэтому вопрос высотного строительства стоит перед человечеством как никогда остро.

Но строительство высотных зданий всегда сопровождает большое количество проблем. Если надежность и безопасность конструкций надземной части по большей части связана с качеством используемых материалов и выполнения работ, то подземная часть сооружения подвержена значительно большему количеству неблагоприятных факторов и рисков. Предусмотреть, предугадать и проанализировать все возможные строительные и эксплуатационные риски технически невозможно, так как они являются вероятностной категорией, зависящей, как от факторов внутренней среды, так и от неуправляемых факторов внешней среды (например, изменение силы и скорости ветрового воздействия вследствие изменения климата; развитие деформации грунтов, их перераспределение в процессе эксплуатации объекта). Одним из рисков является возникновение крена высотного здания [3, с.85]. К основным факторам, способным вызвать риск крена здания можно отнести следующие: это грунтовые условия и

нагрузки, кроме того, это и другие здания и сооружения окружающей застройки, способные оказывать влияние на распределение напряжения в массиве грунта. Поэтому очевиден тот уровень ответственность нулевого цикла работ, который связан с безопасностью функционирования, как самого высотного здания, так и окружающей городской застройки [4,5].

Выбор типа фундамента высотного здания

Как известно, фундамент – это конструкция, воспринимающая нагрузки от вышерасположенных строительных конструкций (колонн, стен, перегородок, перекрытий и т.п.), нагрузок на полы и технологического оборудования. Когда проектируются основания и фундаменты, необходимо выполнить следующие действия [6,7]:

- Обеспечить эксплуатационные требования и прочность, как конструкций, так и всего сооружения в целом.
- Определить прочностные и деформационные характеристики грунтов и их использование.
- Обеспечить максимальную прочность материала фундамента.
- Учесть высоту проектируемого высотного здания и его конструктивные особенности.
- Достичь минимальной стоимости, трудозатратности и материалоемкости с максимальной эффективностью.

Важность геологических изысканий

Давление, приходящееся на фундамент высотного здания, может достигать огромных значений, а такое давление может нести не любой грунт. Инженерно-геологические изыскания – это совокупность работ, направленных на изучение инженерно-геологических условий участка, на котором производится застройка. Строительство высотных зданий и сооружений может вестись на различных грунтах, от глинистых пластичных

грунтов до полускальных и скальных. Основные факторы, влияющие на выбор и тип оснований и фундамента следующие:

1. Величина вертикальной нагрузки от вышестоящих конструкций на фундамент и основание;

2. Физико-механические характеристики грунта.

Однако существует ряд других, не менее важных факторов, требующих учета воздействия и генерирующих возможные рисковые ситуации:

— Наличие подземных грунтовых вод, карстовых полостей, пlyingунов и т.д.

— Наличие плотной городской застройки вблизи строительства высотного здания.

— Строительство происходит в сейсмически опасной зоне.

— Наличие различных внешних инженерных сетей и коммуникаций, слаботочных инженерных систем, которые могут или негативно повлиять на строящийся фундамент или пострадать в результате осадки грунта.

— Разные климатические факторы – перепады температур в различные сезонные периоды, скорость ветра, выпадение снега или осадок.

В настоящее время для расчета величины напряжений в массиве грунта используются континуальные модели, где массив грунта рассматривается, как сплошное тело. Дискретные модели, учитывающие взаимодействие между частицами, получили меньшее распространение. Как известно, среда будет являться однородной, если физико-механические свойства каждой точки будут идентичны друг другу. Следует отметить, что если по физическим характеристикам грунт будет являться однородным, то в результате устройства фундамента, механические характеристики грунта будут проявляться как неоднородные, «и эта неоднородность выражается в линейной зависимости деформационных характеристик грунта от глубины независимо от вида грунта» [3, с 18]. То есть модуль деформации зависит от

глубины расположения рассматриваемой точки грунта. В результате при проведении изысканий и определения зоны деформаций, «размеры зоны изысканий должны превышать размеры фундамента основания высотного здания. Значение превышения должно определяться на основании геологического строения (в первую очередь, его изменчивости в плане) и конструктивных особенностей здания» [3, с.10]. Поэтому, при проектировании и расчете фундаментов высотных зданий особо ответственной работой являются инженерно-геологические изыскания, - исследование прочностных и деформационных характеристик, определение ползучести грунта в полевых условиях, определения начального напряженного состояния грунта, особенно сложенного переуплотненными породами [8,9].

Иные факторы, влияющие на выбор технико-экономических показателей

Определение типа фундамента и оснований зависит от сравнений технико-экономических вариантов проектирования. На выбор ТЭП оказывают непосредственное влияние исходные данные для проектирования, техническая оснащенность производителей работ. Все эти перечисленные факторы между собой взаимосвязаны и в различной степени влияют на выбор типа оснований и конструкций фундаментов. [10,11].

К исходным данным относят:

- Инженерные геологические и геодезические, а также гидрометеорологические данные, которые получают непосредственно из испытаний.
 - Информацию о функциональном и технологическом назначении строящегося здания.
 - Технические характеристики объекта.
 - Нормативно-техническую базу строительного проектирования.
-

Типы фундаментов высотных зданий

Основные типы фундаментов высотных сооружений:

1. Плитные фундаменты (фундамент на естественном основании).
2. Свайные фундаменты глубокого заложения.
3. Свайно-плитный фундамент (СПФ).

Таблица 1

Виды фундаментов в зависимости от вида грунта и высоты здания

ВИД ГРУНТА	Высота здания, м		
	75-150	150-300	Свыше 300
Пески средней плотности, переуплотнённые глинистые грунты	Плита	Сваи	Сваи
Плотные песчаные и гравелистые отложения, твердые переуплотнённые глинистые грунты	Плита	Свайно-плитные фундаменты	Сваи
Крупнообломочные и скальные грунты	Столбчатые и ленточные фундаменты	Свайно-плитные фундаменты	Плита

Источник: [3, с.95]

Плитные фундаменты

Плитные фундаменты строятся (проектируются) на естественных основаниях и применяются, чаще всего, при строительстве относительно невысоких зданий (высотой до 75 м). Как правило, плитный фундамент – это монолитная железобетонная плита, толщиной от 1 до 2,5 м. Иногда, когда основание устойчивое или риск смещения грунта ничтожно мал, допускается применение стандартных ленточных и столбчатых фундаментов. И всё же плитный фундамент является более предпочтительным. Плитный фундамент может применяться даже при строительстве ответственных сооружений, высота которых составляет 100-120 м. В тех местах фундамента, где приходится максимальная нагрузка – предусматриваются дополнительные

ребра жесткости, чаще всего этими областями являются места расположения колонн и пилонов (рис.1).

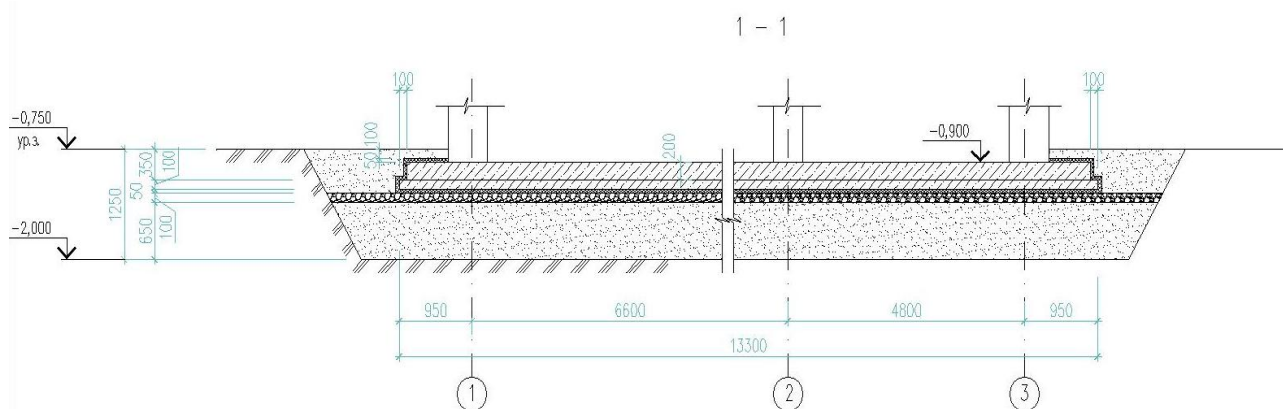


Рис.1. Схема плитного фундамента.

В стоимость монтажа плитного фундамента входит:

- Цены на материалы;
- Инженерно-геологические изыскания участка под строительство фундамента;
- Производство земляных работ (устройство траншей, котлована и т.д.);
- Монтаж и оборудование различных коммуникаций;
- Устройство песчаной подушки и щебёночной подсыпки под фундамент
- Устройство опалубки;
- Устройство армирования плиты фундамента;
- Бетонирование и уход за ним.

Таблица 2

Примерный расчет стоимости готового плитного фундамента

Размер, м	h=200мм	h=250мм	h=300мм	h=350мм	h=400мм
8x8	377 000 р.	464 000 р.	580 000 р.	667 000 р.	754 000 р.
8x10	464 000 р.	580 000 р.	696 000 р.	812 000 р.	928 000 р.
10x10	580 000 р.	725 000 р.	870 000 р.	1 015 000 р.	1160 000 р.

Свайные фундаменты

Свайные фундаменты позволяют строить высотные здания на различных грунтах, включая такие сложные для строительства грунты, которые являются илистыми отложениями, глинистыми или суглинистыми грунтами в текучем или текуче-пластичном состоянии. При строительстве сооружения, у которого высота достигает до 200 м, применяют задавливаемые или забивные сваи квадратного сечения с размерами в поперечнике 30 или 35 см. Однако, их применение ограничено, их не допускается применять в условиях плотной городской застройки.

При выборе такого типа фундамента, чаще всего выкапывается котлован с укрепленными стенками, высота которого зависит от количества помещений подземной части здания, предусмотренных проектом. Стенки котлована укрепляются специальными конструкциями: стена в грунте (СВГ), шпунты, трубошпунты и т.д. Они предназначены для того, чтобы не допустить обрушения стенок котлована внутрь и предохранить фундамент от горизонтальных нагрузок.

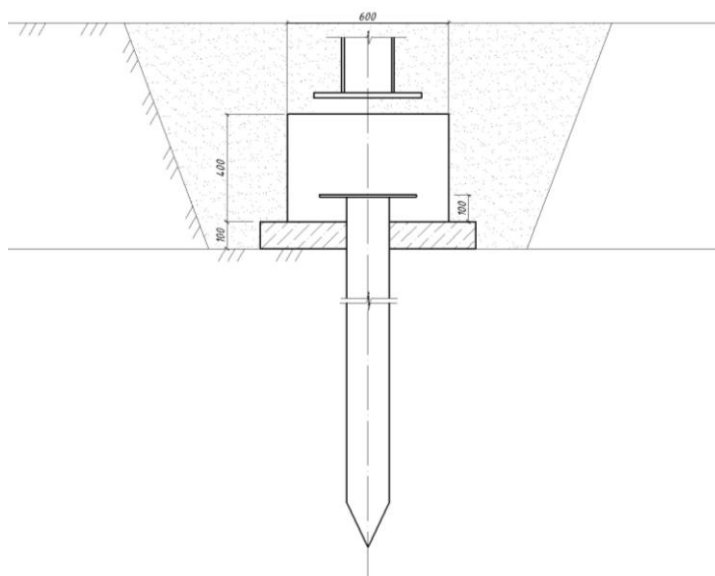


Рис.2. Схема свайного фундамента.

В свайных фундаментах применяются железобетонные сваи диаметром до 2 м и в длину – до 70 м. Если проходка происходит в скальных или очень плотных грунтах, то применяются опускные колодцы, которые заливаются бетоном и становятся обсадной трубой после прохождения до нужной глубины. Цену свайного фундамента в каждом конкретном случае подсчитывают индивидуально. Обычно, в стоимость монтажа входят:

- Цены на материалы;
- Инженерно-геологические изыскания;
- Пробное бурение для определения глубины свай;
- Подсчёт количества свай и их размеры (диаметр; длина стрелы; размер оголовка свай);
- Разработка смет и проектной документации;
- Геодезические разбивочные работы на участке, на котором будет свайное поле;
- Бурение механическими и электромеханическими приборами;
- Монтаж свай и их закрепление.

Таблица 3

Примерный расчет стоимости готового свайного фундамента

Размер здания	Стоимость готового фундамента
8X8 м (24 сваи)	153 000 р.
8X10 м (32 сваи)	188 000 р.
10X10 м (34 сваи)	199 750 р.

Свайно-плитные фундаменты

Свайно-плитные фундаменты также называют комбинированными, так как они объединяет сваи и плиты в единое целое. Это самый сложный тип

фундаментов, позволяющий обеспечить устойчивость высотного сооружения, даже при условии разнородных грунтов.

В комбинированных фундаментах (рис.3) к балкам железобетонной ростверка привариваются оголовки свай. Бурозабивные сваи должны иметь диаметр 18-30 см. Допускается применение сплошных железобетонных забивных свай квадратного сечения с размерами 35 или 40 см в поперечнике.

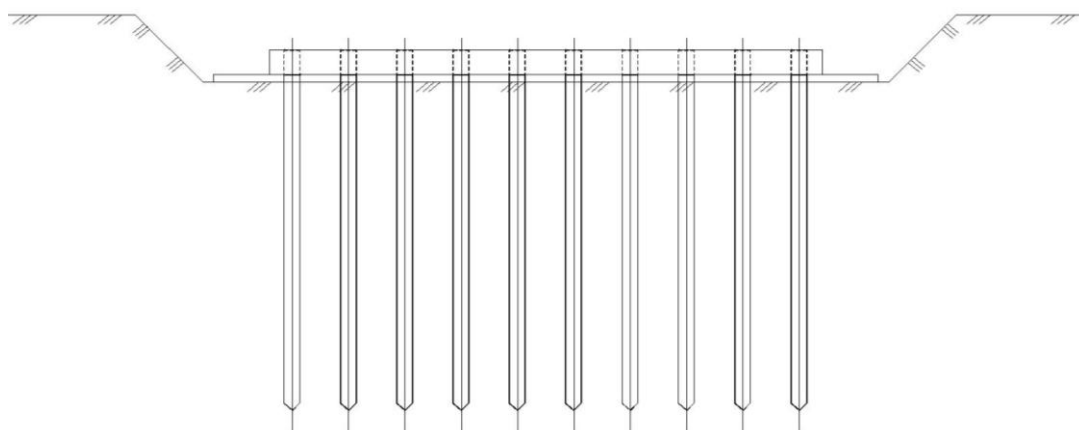


Рис. 3. Схема свайно-плитного фундамента.

В стоимость монтажа свайно-плитного фундамента входит:

- Цены на материалы;
- Инженерно-геологические изыскания;
- Производство земляных и буровых работ;
- Устройство котлована;
- Устройство песчаной подушки под фундамент;
- Монтаж опалубки;
- Устройство армирования;
- Заливка бетона и уход за ним.

Таблица 4

Примерный расчет стоимости готового свайно-плитного фундамента

Размер фундамента, м*м	d=300 мм (диаметр сваи) h=200 мм (толщина плиты)	d=300 мм (диаметр сваи) d=250 мм (толщина плиты)	d=300 мм (диаметр сваи) d=300 мм (толщина плиты)
8x8	342 000 р.	396 000 р.	468 000 р.
8x10	432 000 р.	504 000 р.	594 000 р.
10x10	542 000 р.	632 000 р.	720 000 р.

Для проведения предварительной стоимостной оценки вариантов устройства фундамента рассмотрим условное здание, имеющее размеры в плане 10x10 м. Итак, согласно данным таблиц, затраты составят: на плитный фундамент с толщиной плиты 200 мм – 580 000 руб.; на свайный фундамент (34 сваи) – 199 750 руб.; на свайно-плитного фундамента с толщиной плиты 200 мм – 542 000 руб. Таким образом, общие затраты на строительство свайного фундамента должны быть ниже, чем на остальные варианты.

Однако на общую стоимость строительства фундамента влияют не только глубина заложения и площадь основания. Есть и другие ценообразующие факторы, определяемые рабочей документацией проекта, такие как: состояние и тип грунта; особенности выбранного конструктива подземного сооружения, его уникальность; сложность технологии производства СМР; текущая стоимость материальных ресурсов и эксплуатации строительных машин; текущая заработная плата рабочих. Следует отметить, что при экспериментальном проектировании может быть заложен больший расход ресурсов, например, арматуры.

Для оценки экономичности варианта следует посчитать все виды стоимостных затрат, - текущие *сметно-договорные затраты* (плановые, контрактные) и будущие *эксплуатационные* (прогнозные).

Заключение

Расчет и конструирование фундаментов высотных зданий – это сложная техническая задача с повышенным уровнем ответственности. В крупных городах России темпы роста высотного строительства увеличиваются год от года, и вместе с этим растет и потребность в исследовании особенностей высотного строительства и факторов, влияющих на выбор конструктивного решения фундаментов с учетом территориально-климатических зон региона строительства и сложившейся городской застройки.

Разные геологические условия регионов строительства диктуют необходимость создания уникальных конструктивных решений по основаниям и фундаментам высотных зданий на основе изучения уже существующего опыта строительства, оформленного в виде стандартов, нормативов и правил, а также и диссертационных исследований.

В свою очередь, на разработку конструктивного решения по плитному или свайному фундаменту влияют результаты инженерно-геологических изысканий, основанные на современных методах качественного отбора образцов грунта и последующего определения параметров грунта [11]. Поэтому особую важность приобретают высокоточные и достоверные методы проведения инженерно-геологических работ, в том числе, и испытания грунта сваями, и оценка влияния окружающей застройки, и последующий геотехнический мониторинг состояния грунта.

Применение современных нестандартных конструктивных решений, и, возможно, последующее научно-техническое сопровождение, позволяют повысить как экономичность, так и надежность эксплуатации сооружаемого объекта.

Литература

1. Умаров А. Г., Умаров Р. Г., Блягоз А. М. Особенности высотного строительства в современном мегаполисе // Инженерный вестник Дона. 2020. № 5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N5y2020/6491.
 2. Петрухин В.П., Шулятьев О.А. Геотехнические особенности проектирования и строительства высотных зданий в г. Москве: Российская архитектурно-строительная энциклопедия. Том XIII. Строительство высотных зданий и сооружений. М.: ВНИИТПИ, 2010. 543 с.
 3. Шулятьев О.А. Основные принципы расчета и конструирования плитных и свайных фундаментов высотных зданий: дис. ...докт. тех. наук: 05.23.02. М., 2019. 352 с.
 4. Кайдалов Д.О., Голиков А.В. Расчётные модели узлов стальных каркасов многоэтажных зданий // Инженерный вестник Дона. 2020. № 8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2020/6590.
 5. Мариничев М. Б., Ещенко О. Ю., Чумак М. В., Ткачев И.Г. Основы расчета и конструирования фундаментов высотных и уникальных зданий: учеб. пособие. Краснодар: КубГАУ, 2017. 90 с.
 6. Фадеев А.Б., Мангушев Р.А., Лукин В.А. Расчет плитно-свайного фундамента // Вестник гражданских инженеров. 2007. № 2. С.64-66.
 7. Мангушев Р.А., Ершов А.В, Осокин А.И. Современные свайные технологии: учеб. пособие. М.: АСВ; СПб.: СПб. гос. арх.-стр.ун-т, 2007. 235 с.
 8. Кадомцев М. И. Исследование деформирования частично заглубленного фундамента при гармоническом воздействии с использованием метода граничных элементов и метода конечных элементов // Инженерный вестник Дона. 2012. № 3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2011/700.
-

9. Кузнецов М. В., Бердичевский Д. В. Проектные решения по усилению грунтов основания жилого дома // Инженерный вестник Дона. 2017. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4073.

10. Hanna, T. H. Model Studies of Foundations Groups in Sands / T. H. Hanna // Geotechnique. London, England. Vol. 13. 1963. P. 334–351.

11. Shuljatjev, O. A. Skyscrapers of «Moscow-City» Business Center – Testing of Bore Piles / O. A. Shuljatjev, I. G. Ladyzhensky, P. I. Yastrebov / Proc. of the 18th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Paris. 2013. P. 2869–2862.

References

1. Umarov A. G., Umarov R. G., Blyagoz A. M. Inzhenernyj vestnik Dona. 2020. № 5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N5y2020/6491.

2. Petruhin V.P., SHulyat'ev O.A. Geotekhnicheskie osobennosti proektirovaniya i stroitel'stva vysotnyh zdaniy v g. Moskve: Rossijskaya arhitekturno-stroitel'naya enciklopediya [Geotechnical features of the design and construction of high-rise buildings in Moscow: Russian architectural and construction encyclopedia]. Tom XIII. Stroitel'stvo vysotnyh zdaniy i sooruzhenij. M.: VNIINTPI. 2010. 543 p.

3. Shuljatjev O. A., Osnovnye principy rascheta i konstruirovaniya plitnyh i svajnyh fundamentov vysotnyh zdaniy [Basic principles of calculation and design of slab and pile foundations for high-rise buildings]: dis. ... dokt. tekhn. nauk: 05.23.02. M., 2019. 352 p.

4. Kajdalov D.O., Golikov A.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2020. № 8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2020/6590.

5. Marinichev M. B., Eshchenko O. YU., CHumak M. V., Tkachev I.G. Osnovy rascheta i konstruirovaniya fundamentov vysotnyh i unikal'nyh zdaniy. [Fundamentals of calculation and design of foundations for high-rise and unique buildings]. Krasnodar: KubGAU. 2017. 90 p.



6. Mangushev R.A., Fadeev A.B. Vestnik grazhdanskih inzhenerov. 2007. pp. 64-66.
7. Mangushev R.A., Ershov A.V., Osokin A.I. Sovremennye svajnye tekhnologii: uchebnoe posobie [Fundamentals of calculation and design of foundations for high-rise and unique buildings: a tutorial]. Moskva: ASV; S. Peterburg: SPb. gos. arh.-str.un-t. 2007. 235 p.
8. Kadomcev, M. I. Inzhenernyj vestnik Dona. 2012. № 3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2011/700.
9. Kuznecov M. V., Berdichevskij D. V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2017. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4073.
10. Hanna, T. H. Model Studies of Foundations Groups in Sands. T. H. Hanna. Geotechnique. London, England. Vol. 13. 1963. pp. 334–351.
11. Shuljatjev O. A., Ladyzhensky I. G., Yastrebov P. I. Skyscrapers of «Moskva-City» Business Center. Testing of Bore Piles. Proc. of the 18th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Paris. 2013. pp. 2869–2862.