

Анализ и систематизация факторов, влияющих на рациональный выбор конструктивных решений фундаментов высотных комплексов

И.В. Кожевникова, В.В. Полити

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)

Аннотация: Огромные нагрузки от надземных конструктивных элементов высотных зданий и высокая стоимость мероприятий по устройству подземных конструкций создают свои особенности проектирования фундаментов. Современные архитектурные концепции и конструктивные решения должны опираться на геотехническое обоснование еще на этапе разработки общего архитектурного замысла проекта. В данной работе изучается проблема выбора типа фундамента высотного здания с точки зрения технико-экономической рациональности на основе изучения опыта проектирования сложных многофункциональных комплексов Москвы и Санкт-Петербурга. Авторы считают, что на выбор конструктивного решения фундамента высотного комплекса влияют не только очевидные геологические факторы, но и скрытые социально-экономические. Результатом данного исследования являются группировка и систематизация геотехнических факторов территории застройки и экономических факторов городской среды, напрямую или опосредованно влияющих на проекты строительства высотных комплексов. Выявленные характерные причины и движущие силы могут являться основанием для проведения многомерного факторного анализа с целью изучения процесса рационального выбора.

Ключевые слова: высотные комплексы, фундаменты, комбинированный фундамент, сваи-РИТ, геотехнический расчет, геотехнический мониторинг, геотехнические факторы, социально-экономические факторы, факторы городской среды, рациональный выбор.

Введение

В настоящее время муниципалитеты крупных городов ставят перед градостроителями сложные задачи, связанные с идеями создания современного города, олицетворяющего прогресс, гуманистические ценности, экоустойчивость среды обитания. Данные идеи претворяются в жизнь путем строительства многофункциональных высотных комплексов. В связи с этим, инженеры-геотехники, находясь в составе проектов, реализующих архитектурный авангардизм, научились рассчитывать, проектировать и строить фундаменты высотных зданий не только на надежных скальных грунтах, но и на площадках с карстовыми процессами, на слабых и намывных грунтах и в зонах с высокой сейсмической

опасностью. Следовательно, научные, изыскательские и конструктивные задачи по реализации проектов высотного строительства, связанных с формированием имиджа города, все продолжают усложняться.

Связующим звеном между верхней частью здания и основанием является *фундамент*, воспринимающий и распределяющий нагрузку от здания – ветровую, динамическую, от собственного веса – по грунту таким образом, чтобы тот смог выдержать эту нагрузку, причем с минимально возможными деформациями.

Огромные нагрузки от надземных конструктивных элементов высотных зданий, чувствительность к кренам, воздействие на окружающую городскую застройку, высокая стоимость мероприятий по устройству подземных конструкций сооружения создают свои особенности при проектировании [1]. Особой проблемой является динамика подземных вод, в частности, развитие просадок водоносных грунтов во времени [2].

В данной работе затрагивается проблема выбора типа фундамента высотного здания с точки зрения технико-экономической рациональности.

Материалы и методы

Для проведения исследования были использованы открытые источники информации по проектам строительства многофункционального высотного комплекса «Московский международный деловой центр (ММДЦ) «Москва-СИТИ» и общественно-делового комплекса «Лахта-Центр» (Санкт-Петербург), представленные сотрудниками научно-исследовательского, проектно-изыскательского и конструкторско-технологического института оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсеванова (Москва).

Отдельно изучен многолетний опыт применения свай-РИТ, изготовленных по разрядно-импульсной технологии, в фундаментах зданий высотой 78-140 м. Также был изучен опыт проектирования и строительства

международной инженерной ассоциации профессора Р. Катцебаха (Франкфурт-на-Майне–Москва–Киев).

Особенности геологического строения площадки строительства ММДЦ «Москва-СИТИ» уже хорошо изучены и описаны в научной литературе. В целом, для Москвы характерно «достаточно глубокое (свыше 30 – 40 м) залегание скальных пород и относительно низкие их механические характеристики, существенная неоднородность, трещиноватость и подверженность карстово-суффозионным процессам верхних горизонтов известняков» [3, с.106]. Сложность выполнения геотехнического обоснования и конструктивных расчетов заключалась в отсутствии возможности использования существующих нормативных методик, основанных на эмпирических данных, рассчитанных на высоту зданий до 25-ти этажей. Поэтому особо ответственные расчеты и моделирование выполнялись несколькими научно-исследовательскими и проектными организациями и их результаты сопоставлялись в рамках научно-техническое сопровождения мега-проекта.

Представляет научно-практический интерес опыт реализации проектов строительства высотных зданий в сложных инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга, где скальные грунты, которые обычно используются в качестве оснований, залегают на глубине 200 м, а до глубины 30-40 м залегают слабые грунты. При устройстве свай глубиной более 100 м каждый дополнительный метр становится «золотым» с точки зрения стоимости реализации проектного решения по фундаменту. Опыт же такого строительства, как опирание свай на вендские глины, отсутствовал даже у метростроевцев.

При изучении геотехнических аспектов строительства башни общественно-делового комплекса «Лахта-Центра» (изначально, «Охта-Центр») Петрухиным В.П., Шулятьевым О.А., и др. было отмечено, что

каждое высотное здание обладает уникальными индивидуальными геометрическими, жесткостными и прочностными характеристиками, что затрудняет прямое использование стандартных нормативных документов (методик) и требует многовариантного подхода [4].

В качестве фундамента здания было принято основание из свай-баретт, заглубляемых на 75-метровой отметке в слой вендских глин, обладающих модулем деформации свыше 150 МПа [5]. Результаты геотехнического анализа и уникальные конструктивно-технологические решения представлены в табл.1.

Таблица 1

Исследования и технологические решения по устройству фундамента на площадке строительстве высотного здания «Лахта-Центр» (Санкт-Петербург)

ГЕОТЕХНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	Влияние особых характеристик твердых глинистых грунтов
	Напряженно-деформированное состояние массива грунта при устройстве баретт стены в грунте
	Взаимодействие свай между собой и грунтом в процессе нагружения
КОНСТРУКЦИИ	Двухуровневая нижняя плита коробчатого фундамента
	Удерживающие конструкции котлована выполнены в виде железобетонных кольцевых плит шириной 10 м
	Различная длина буронабивных свай
	Коробчатый фундамент
УСТРОЙСТВО	Устройство фундаментной плиты (19624 куб. м было уложено одновременно в тело фундамента за 49,5 ч). <i>Примечание: внесено в книгу рекордов Гинесса.</i>
	Устройство буронабивных свай «насухо» (без применения бентонита и полимера) ниже уровня подземных вод
	Устройство свай до экскавации грунта из котлована

Источник: составлено на основе [4,5].

Во-вторых, особенности высотного строительства требуют от специалистов-проектировщиков не только умения пользоваться расчетными комплексами (Plaxis3D, FEM-Models, LS-Dyna, и др.), но и обладания специфическими знаниями в области теории упругости и пластичности, механики грунтов и инженерной геологии. Например, для выполнения достоверного расчета и обеспечения надежности проектирования

рекомендуется делать совместные расчеты взаимодействия верхней конструкции здания и фундамента. При этом может быть использован как единый совместный расчет (верхняя конструкция и фундамент рассматриваются, как единое целое), так и итерационная методика, заключающаяся в пошаговом уточнении нагрузки, действующей на сваю, и ее податливости (расчетного коэффициента жесткости) (рис.1).

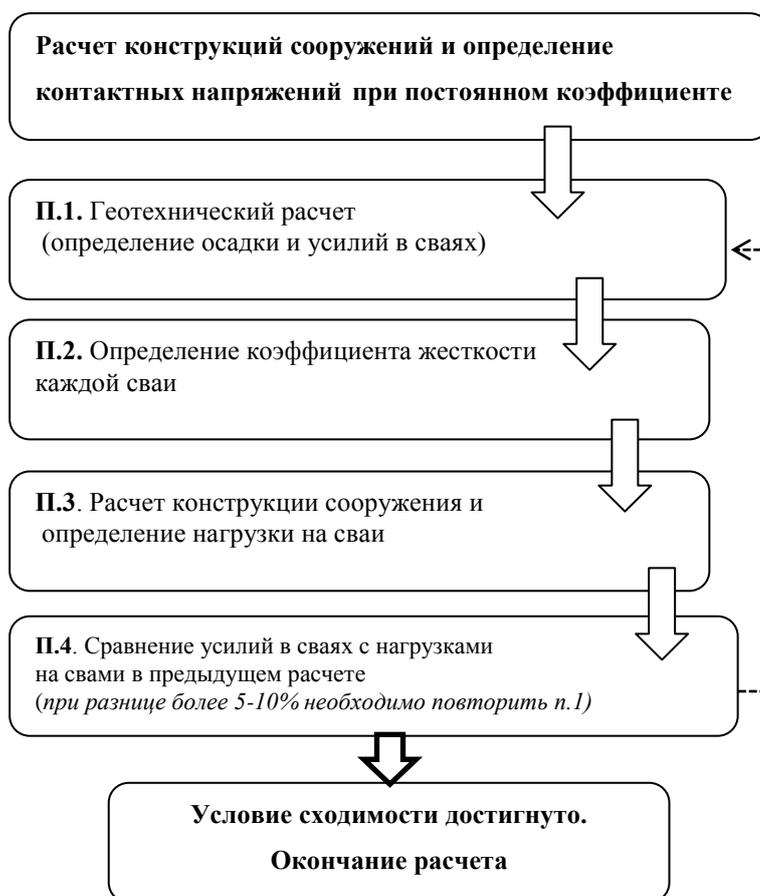


Рис.1. – Итерационная схема расчета фундамента.

Источник: составлено с использованием данных [4,5]

И в третьих, необходимо осуществлять научное сопровождение работ по геотехническому моделированию, вариантному проектированию и строительству, так и последующему эксплуатационному мониторингу.

Кубецкий В.Л. и. Еремин В.Я в течение нескольких лет исследовали эффективность применение свай-РИТ в высотном строительстве. Так, большинство высотных зданий предусматривает строительство подземной парковки, что требует значительного углубления котлована, в результате чего возникает риск разуплотнения основания. Применение свай-РИТ позволяет создать биомассив, в котором основание и фундаментная плита работают как единый блок [6]. Однако в процессе выполнения строительных работ уже выше нулевого цикла возможно возникновение рисков ситуаций, - ухудшение физико-механических свойств грунтов основания, что в последствие может оказать негативное влияние на несущую способность здания [7].

Егоров Е.А. в своей работе описывает технические решения по предотвращению крена строящегося здания, вызванного ухудшением физико-механических свойств основания, и выявляет причины. При расчете фундаментов высотных зданий является важным также учет механической анизотропии, начального НДС и консолидации грунта.

Представляет практический интерес опыт международной инженерной ассоциации профессора Р. Катцебаха (Франкфурт-на-Майне–Москва–Киев) в области снижения материалоемкости и оптимизации стоимости высотного строительства [8]. На примере высотных зданий «Мессетурм», башни «Федерация» и «Mirax Plaza» показана возможность экономии ресурсов и сокращения расходов при использовании конструкции свайно-плитного фундамента (КСПФ) и оптимизации проекта свайного фундамента с помощью соответствующего проведения испытания свай. Также отмечается, что процедуры проектирования КСПФ в России отличаются от процедур проектирования в Германии, где установлены повышенные требования к расчетной схеме [9].

Результаты и обсуждение

Под *фундаментом* понимается подземная часть здания или сооружения, которая воспринимает на себя все нагрузки – постоянные, временные – возникающие в надземных элементах, и в дальнейшем передает давление от этих нагрузок на основание.

Рациональный выбор конструкции фундамента высотного здания – это результат вариантного проектирования, включая моделирование и испытания, соответствующий индивидуальным условиям района строительства (инженерно-геологическим, экономико-градостроительным), нормам, отвечающий требованиям надежности, экономичности и прогрессивности. Научно-техническое сопровождение процессов проектирования и строительства – залог рационального выбора варианта конструкции основания и фундамента (ОФ).

Наиболее эффективными решениями фундаментов высотных зданий являются следующие виды: *свайные; плитные; комбинированные свайно-плитные*. Заметим, что в инженерно-геологических условиях площадки строительства ММДЦ «Москва-СИТИ» выбор рациональных типов ОФ сооружений комплекса или их отдельных частей изначально был ограничен небольшим числом вариантов: плитным, свайным и объединенным плитно-свайным.

Рассмотрим кратко преимущества и недостатки традиционных видов конструкций фундаментов высотных зданий и актуальные прогрессивные конструктивные решения.

1. Плитный фундамент

Технико-экономические особенности. Плитные фундаменты подразделяются на переменной толщины, повышенной жесткости, а также коробчатого типа с развитой подземной частью, на естественном или искусственном основании. Они обычно являются наиболее *экономичными* по

расходу материала и наиболее простыми по техническим решениям. Однако при применении таких фундаментов для строительства высотных зданий можно встретиться с такими проблемами, как *появление кренов, выпоров грунта из-под края фундамента, значительных изгибающих усилий в конструкции фундамента, возможности потери общей устойчивости здания*, поэтому необходимо с особой тщательностью относиться к расчетному обоснованию.

Практика применения. Примером такого типа фундамента могут послужить небоскребы, построенные в середине прошлого века, такие, как здание Московского государственного университета им. Ломоносова М.В. Современным же примером применения такой конструкции является высотное здание «Эдельвейс», расположенное в Москве в районе Кутузовского проспекта.

2. Свайный фундамент

Технико-экономические особенности. Применение этого типа фундамента характерно в условиях слабых сильносжимаемых водонасыщенных грунтах, а также при строительстве, когда необходимо со стен и колонн передать большие нагрузки на основание. Свайный фундамент способствует передаче нагрузки на более плотные глубинные грунты. Под высотным зданием устраивается свайное поле, состоящее из свай, чаще всего буронабивных или буроинъекционных, объединенных сверху сплошной массивной жесткой плитой – ростверком. Является более дорогим проектным решением, чем плитный фундамент.

Практика применения. В таких городах, как Нью-Йорк и Чикаго (США) основанием для фундаментов служат скальные грунты, залегающие неглубоко от поверхности. В связи с этим, небоскребы в Нью-Йорке установлены на металлических Н-сваях диаметром метр на метр, а в Чикаго – на мощных столбах-сваях. В отличие от вышеописанных высоток, фундамент

«Бурдж-Халифа» (ОАЭ, Дубай) не имеет под собой скальное основание, поэтому здесь использовались висячие сваи длиной 45 м и диаметром 1,5 м.

3. Комбинированный свайно-плитный фундамент

Технико-экономические особенности. Представляет собой фундаментную плиту, усиленную забивными или буронабивными сваями. В этом варианте конструкции фундамента нагрузка воспринимается совместно плитой и сваями, перераспределяясь между ними в зависимости от шага свай, который колеблется от 5 до 6 диаметров. Является наиболее дорогим проектным решением по сравнению с рассмотренными выше.

Практика применения. Примером спешного и неоднократного применения такого типа фундамента может послужить устройство комбинированных свайно-плитных фундаментов во Франкфурте-на-Майне, при возведении таких высотных зданий, как «Maintower», «Messeturm».

4. Прогрессивные способы устройства фундаментов для высотных зданий (или прогрессивные конструктивные решения)

Технико-экономические особенности. Конструкция фундамента представляет собой ленточный фундамент, являющийся опорным контуром, в промежутках которого устраиваются выпуклые вверх цилиндрические поверхности, расположенные по грунту. Самым распространенным типом этого вида фундамента является *ленточно-оболочечный* фундамент, особенностью которого является повышение несущей способности за счет вовлечения в работу грунта под оболочкой.

Схожей конструкцией и идеей включения основания в работу обладает *свайно-оболочечный* фундамент, отличающийся тем, что опорным контуром уже является ростверк со сваями. Вернемся к основной проблеме, затронутой в нашем исследовании. Для того, чтобы выбрать тип фундамента высотного здания с точки зрения технико-экономической целесообразности,

необходимо проанализировать и систематизировать факторы, влияющие на выбор конструкции (табл.2).

Таблица 2

Систематизация основных факторов, влияющих на рациональный выбор конструкции фундамента высотного здания

1. ТЕРРИТОРИАЛЬНО-КЛИМАТИЧЕСКИЕ И ГЕОТЕХНИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ	2. ФАКТОРЫ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ, РЕСУРСНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ДР. СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ
1	2
<p>ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ (инженерно-геологические, гидрогеологические, климатические)</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ геоморфологические условия; ○ геологические факторы в сфере взаимодействия зданий и сооружений с геологической средой; ○ гидрогеологические факторы в сфере взаимодействия зданий и сооружений с геологической средой; ○ геологические и инженерно-геологические процессы, отрицательно влияющие на условия строительства и эксплуатации зданий и сооружений (карстово-суффозионные, оползневые и т.д.); ○ территориально-климатические факторы 	<p>ОБЩИЕ (присущие экономике градостроительства)</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ функционально-территориальное зонирование городской территории; ○ существующая планировка городских кварталов (исторические объекты, уникальные объекты – в зоне влияния строительства); ○ стратегические планы развития городских территорий; ○ доступность основных строительных ресурсов; ○ уникальность требуемых строительных машин и механизмов и стоимость их эксплуатации (аренды); ○ трудоемкость выполнения СМР по устройству основания и фундамента; ○ стоимость проектных и строительных работ; ○ специфика предпроектных исследований ○ специфика проектирования ○ стоимость научно-технического сопровождения

Источник: составлено авторами

Выберем две группы факторов, - территориально-климатические и геотехнические факторы, причем, принимаем, что конструктивно-технологические решения по устройству фундамента зависят от определенной геотехнической категории. Вторая группа факторов – это факторы городской среды, ресурсно-экономические и др. специфические факторы. Здесь принимаем, что конструктивно-технологические решения по устройству фундамента зависят от архитектурного городского ландшафта

территории застройки; экономики региона; природных ресурсов региона; трудовых ресурсов; стоимости строительства и эксплуатации (табл. 3).

Таблица 3

Систематизация частных факторов, влияющих на рациональный выбор конструкции фундамента высотного здания

3. ТЕРРИТОРИАЛЬНО-КЛИМАТИЧЕСКИЕ И ГЕОТЕХНИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ	4. ФАКТОРЫ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ, РЕСУРСНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ДР. СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ
1	2
<ul style="list-style-type: none">○ технико-экономические параметры, указанные в задании на проектирование;○ физико-механические характеристики грунтов;○ несущая способность грунтов основания;○ коррозионная активность грунтов основания;○ сезонные перепады температур (диапазон температур);○ увлажненность грунта в связи с сезонными дождями, паводками, таянием снегов;○ пучинистость влажных грунтов в связи с морозами;○ оползневые, эрозийные и усадочные характеристики почв;○ присутствие источников грунтовых вод, подземных рек, пьезунов, карстовых пустот и других подземных аномалий;○ уровень залегания грунтовых вод;○ скорость консолидации грунтов;○ наличие сейсмической активности;○ наличие напряжений пород природного и техногенного происхождения в регионе строительства;○ вес сооружения (нагрузки, приходящиеся на фундамент)	<ul style="list-style-type: none">○ строительство в историческом районе города;○ высокая плотность застройки городской территории;○ расположение вблизи строительства крупных объектов;○ проходящие в непосредственной близости транспортные коммуникации, тоннели метро, газо- и водопроводы;○ необходимость научного сопровождения;○ необходимость вариантного проектирования○ длительность проектного цикла выполнения работ, использование методов вариантного проектирования;○ длительность строительного производства;○ наличие, стоимость и транспортная доступность производственных ресурсов;○ наличие, стоимость и транспортная доступность строительных материалов;○ стоимость геомониторинга на стадии строительства и эксплуатации;○ стоимость научного сопровождения инвестиционно-строительного проекта на всех стадиях жизненного цикла;○ уникальность проектов строительства высотных зданий и сооружений и их стоимость

Источник: составлено авторами

Заключение

На процесс принятия решения по выбору типа фундамента влияют многочисленные факторы, связанные как с геологическими особенностями участка строительства, архитектурными и конструктивными решениями, так и с социально-экономическими факторами. Вполне очевидно, что невозможно только по результатам сравнения технико-экономических

показателей сойтись на конкретном решении, какой тип фундамента высотного здания более целесообразен. Наряду с такими показателями, как расход материалов, трудоемкость, стоимость, должны также учитываться особенности инженерно-геологических условий строительной площадки.

Следовательно, при строительстве высотных зданий, выбирая конструкции фундамента, нужно опираться не только на результат технико-экономического сопоставления, но на итоги геотехнических расчетов, при этом учитывая соблюдение правил безопасности при строительстве и последующей эксплуатации здания.

Однако не стоит забывать и о влиянии на изменение конструктивных решений экономических и социально-экономических, в том числе, и градостроительных факторов [10], наилучшим примером действия которых является изменение местоположения проекта высотного здания общественно-делового центра «Лахта-Центра» (изначально, «Охта-Центр») и увеличение его высоты, что, безусловно, повлияло на изменение величины технико-экономических параметров проекта и состава конструктивных решений по основанию и фундаменту объекта.

Литература

1. Шилин Н. В., Полити В. В. Техничко-экономическое сравнение вариантов проектирования фундаментов на примере высотного строительства // Инженерный вестник Дона. 2022. № 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7693.

2. Yudina I. Analytical method of forecasting the settlement of water-saturated soils over time IPICSE-2018. URL: doi.org/10.1051/mateconf/201825104030.

3. Петрухин В.П., О. А. Шулятьев О.А., Безволев С.Г., Боков И.А. С опорой на толщу надежных известняков. Расчёты основания и фундаментов высотной башни на участке № 2 – 3 ММДЦ «Москва – СИТИ» // Высотные здания: журнал высотных технологий. 2011. № 1. С. 104-113.

4. Шулятьев О. А., Мозгачева В.Е., Мышинский В.Е. Опыт проектирования и строительства защитных мероприятий в виде геотехнического барьера по методу компенсационного нагнетания // Фундаменты. 2021. № 2(4). С. 18-23.

5. Травуш В.И., Шахраманьян А.М., Колотовичев Ю.А., [и др.] «Лахта Центр»: автоматизированный мониторинг деформаций несущих конструкций и основания // Academia. Архитектура и строительство. 2018. № 4. С. 94-108.

6. Кубецкий В. Л., Еремин В.И. Применение свай-РИТ в фундаментах высотных зданий // Вестник МГСУ. 2012. № 4. С. 240-245.

7. Егоров Е. А. Технические решения по предотвращению крена строящегося здания вызванного незапланированным ухудшением свойств основания // Инженерный вестник Дона. 2021. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2021/6888.

8. Katzenbach R. Optimized design of high-rise building foundations in settlement-sensitive soils / International Geotechnical Conference of Soil-Structure Interaction. St. Petersburg. 26–28.5.2005, Pp. 39–46.

9. Катценбах Р., Леппла Ш., Фоглер М., Дунаевский Р.А., Куттиг Х. Опыт оптимизации стоимости фундаментов высотных зданий // Жилищное строительство. 2010. №5. URL: cyberleninka.ru/article/n/opyt-optimizatsii-stoimosti-fundamentov-vysotnyh-zdaniy.

10. Дорошин, И. Н., Драгич М. Особенности энергоэффективности и зарубежный опыт применения энергоэффективных фасадных систем в жилищном строительстве // Инженерный вестник Дона. 2022. № 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7720.

References

1. SHilin N. V., Politi V. V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, № 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7693.



2. Yudina I.M. IPICSE 2018. URL: doi.org/10.1051/mateconf/201825104030
3. Petrukhin V.P., O. A. SHulyat'ev O.A., Bezvolev S.G., Bokov I.A., Vysotnye zdaniya: zhurnal vysotnykh tekhnologij, 2011, № 1, pp. 104-113.
4. SHulyat'ev O. A. , Mozgacheva V.E., Myshinskij V.E. Fundamenty, 2021, № 2(4), pp. 18-23.
5. Travush V.I., SHakhraman'yan A.M., Kolotovichev YU.A, [i dr.] Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo, 2018, № 4, pp. 94-108.
6. Kubetskij V. L., Eremin V.I. Vestnik MGSU. 2012. № 4. S. 240-245.
7. Egorov E. A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2021/6888.
8. Katzenbach R. International Geotechnical Conference of Soil-Structure Interaction. St. Petersburg. 26–28.05.2005, pp. 39–46.
9. Kattsenbakh R., Leppla SH., Fogler M., Dunaevskij R.A., Kuttig KH. ZHilishhnoe stroitel'stvo, 2010, №5. URL: cyberleninka.ru/article/n/opyt-optimizatsii-stoimosti-fundamentov-vysotnyh-zdaniy.
10. Doroshin, I. N., Dragich M. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, № 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7720.