

УДК 69.032.2

## ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ

**Н.В. Шлафман**

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург (Российская Федерация)*

**Аннотация.** Строительство высотных зданий обусловлено потребностью эффективно использовать уже застроенные участки городов. Современные архитектурно-пространственные и объемно-планировочные решения высотных зданий отличаются разнообразием поэтажной конфигурации, новыми техническими решениями инженерных и подъемно-транспортных систем и механизмов. Проектирование и возведение высотных зданий по сложности превосходят другие виды зданий и сооружений, главным образом, за счет многократного превышения высоты над площадью основания, что создает значительные нагрузки на несущие конструкции. Значение несущих конструкций заключается не только в том, чтобы нести собственный вес здания, но и в том, чтобы воспринимать дополнительные нагрузки природно-климатических условий. Высотные здания во всем мире относят к объектам самого высокого уровня ответственности и класса надежности. Удельная стоимость их строительства значительно выше обычных зданий, что объясняется не только технологическими, конструктивными и другими факторами, но в большей степени мерами комплексной безопасности, принимаемыми на всех стадиях проектирования, строительства и эксплуатации здания. В статье показаны особенности конструкций фундаментов высотных зданий с учетом инженерно-геодезических и геологических условий, а также с учетом дополнительных нагрузок. В качестве примера приведен фундамент башни Лахта Центра в Санкт-Петербурге.

**Ключевые слова:** высотные здания, конструкции, фундамент, строительство, нагрузки, геодезия, геологические условия, Лахта Центр.

**Ссылка для цитирования:** Шлафман Н.В. Особенности конструкций высотных зданий // Инженерные исследования. - 2021. - № 4(4). - С. 33-40. – URL: <http://eng-res.ru/archive/2021/4/33-40.pdf>

## CONSTRUCTION FEATURES OF HIGH-RISE BUILDINGS

**N.V. Shlafman**

*Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)*

**Abstract.** The construction of high-rise buildings is due to the need to effectively use the already built-up areas of cities. Modern architectural-spatial and space-planning solutions of high-rise buildings are distinguished by a variety of floor configurations, new technical solutions of engineering and lifting-and-transport systems and mechanisms. The design and construction of high-rise buildings in complexity surpass other types of buildings and structures, mainly due to the multiple excess of the height above the base area, which creates significant loads on the supporting structures. The importance of load-bearing structures lies not only in carrying the dead weight of the building, but also in taking in the additional loads of natural and climatic conditions. All over the world, high-rise buildings are classified as objects of the highest level of responsibility and reliability class. The unit cost of their construction is much higher than conventional buildings, which is explained not only by technological, structural and other factors, but to a greater extent by the integrated safety measures taken at all stages of the design, construction and operation of the building. The article shows the features of the structures of the foundations of high-rise buildings, taking into account engineering-geodetic and geological conditions, as well as taking into account additional loads. The foundation of the Lakhta Center tower in St. Petersburg is shown as an example.

**Keywords:** high-rise buildings, structures, foundation, construction, loads, geodesy, geological conditions, Lakhta Center.

**For citation:** Shlafman N.V. Construction features of high-rise buildings // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. - 2021. - No. 4(4). - Pp. 33-40. – URL: <http://eng-res.ru/archive/2021/4/33-40.pdf>

## ВВЕДЕНИЕ

Согласно квалификации, принятой в России, здания и сооружения высотой более 100 метров являются уникальными, выше 75 метров – высотными. Для проведения соответствующих строительных работ необходимо провести огромный объем подготовительных работ, как, например, инженерно-геодезические изыскания, которые направлены на общее изучение местности, экологии, геологии, грунтов, оптимизацию строительства и др. После изучения грунта необходимо произвести тщательный анализ и расчет конструкций, т.к. именно сложный рельеф часто влияет на трудоемкость строительства. Помимо механики грунтов необходимо учитывать огромное количество факторов, действующих на всю конструкцию: постоянные, переменные, инерционные нагрузки и т.д. Как следствие, конструкции небоскребов требуют неразрывности элементов, передающих нагрузку на основание и согласованность распределения нагрузки каждого этажа. Исходя из этого, можно сказать, что высотное здание представляет собой одну взаимосвязанную конструкцию, разработка подходов к расчетам и техническим решениям которой зачастую длится дольше самого строительства [1-4].

## ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ

Следует учесть, что выбор вида фундамента зависит от широкого спектра факторов. На начальном этапе строительства производится инженерно-геодезические изыскания [4-11]. Эти работы направлены на изучения рельефа местности, они служат основой подготовки строительства. Выделяют три основных вида инженерно-геодезических изысканий:

1. Геологические изыскания – позволяют определить особенности сооружения, выбрать подходящий тип фундамента, рассчитать достаточную толщину и уровень основания здания. Они проводятся при необходимости подробного изучения грунтов в области строительства. Также подобного рода изыскания предоставляют информацию о рельефе и геологическом строении данной области.

2. Инженерно-геодезические исследования – обязательный подготовительный этап строительства здания, позволяющий определить расположение объекта. Современные методы строительства позволяют возводить сооружения в любых условиях, однако данный вид изысканий необходим для точного прогнозирования изменения рельефа местности и грунтов.

3. Инженерно-экологические исследования – проводятся в целях подтверждения безопасности, проводимых работы для близлежащих жилых зданий и сооружений, а также минимизировать влияние строительства на окружающую среду. Эти данные влияют на конечную стоимость помещений в здании в этом районе.

В случае с изучением особенностей конструкций фундамента необходимо обратить внимание на геологические изыскания, т.к. именно они дают полноценную информацию о рельефе и грунтах, которые серьезно влияют на выбор несущих конструкций основания сооружения. Для классификации различных типов почв был разработан ряд систем классификации. Некоторые из них были разработаны специально в связи с установлением пригодности грунта для использования в конкретных почвенных инженерных проектах. Некоторые из них носят скорее предварительный характер, в то время как некоторые являются относительно более исчерпывающими, хотя некоторая степень произвольности обязательно присуща каждой из систем.

## ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

При выборе фундамента необходимо учитывать типы почв.

1. Песчаные грунты. В состав песчаных грунтов входят частицы размером от 0,1 до 2 мм. Песчаные грунты делятся на гравелистые, крупные, средние, мелкие и пылеватые в зависимости от размера частиц. Коэффициент сжатия плотного песка невелик, но скорость его уплотнения под воздействием нагрузки высока. Поэтому осадок строения, построенного на песке, прекращается довольно быстро. Обладают с высокой водостойкостью и поэтому не вспучиваются в замороженном состоянии. Пыльными частицами называются частицы размером от 0,05 до 0,005 мм. Если песчаная почва содержит такие частицы от 15 до 50%, то такие пески также называются порошкообразными. Хорошей основой для здания может служить песчаная почва с равномерной плотностью и необходимой мощностью. В то же время следует отметить, что такие грунты не должны подвергаться воздействию грунтовых вод.

2. Скальные грунты. Такие грунты бывают в виде сплошного массива. К этой категории относятся песчаники, кварциты и граниты. Этот материал полностью водонепроницаем и несжимаем. Если в таком грунте нет полостей или трещин, он лучше всего подходит для строительства.

3. Суглинки и супеси. Эти грунты представляют собой смесь глины, песка и пыльных частиц. Они состоят из 30% частиц глины и от 3 до 10% пыльных частиц. Эти грунты занимают промежуточное

место между песчаными и суглинистыми грунтами из-за их технических параметров и удобства в строительстве.

4. Глинистые грунты. В состав этих почв входят мелкие частицы размером не более 0,005 мм. Глина имеет достаточное количество капиллярных каналов и большую удельную площадь контакта между частицами. Капиллярные каналы облегчают проникновение воды во все поры материала, и образуются тонкие водные коллоидные пленки, которые, в свою очередь, обволакивают частицы основного каркаса. Это придает глине необходимую вязкость для строительства. С другой стороны, наличие капель воды в глинистых порах во время замерзания увеличивает объем, что влечет за собой процесс вспучивания. Глинистые грунты характеризуются высоким сжатием (например, по сравнению с песчаными почвами), хотя под воздействием нагрузок скорость осадки намного меньше, чем у песка. Поэтому, если фундамент для здания глиняный, осадок сохраняется долго. Содержание влаги в глине влияет на ее грузоподъемность. Например, грузоподъемность глины в пластическом и сжиженном состоянии очень мала, в то время как сухая глина может выдерживать относительно большие нагрузки.

5. Грунты с органическими примесями. К этой категории почв относятся торф, ил, болотный торф. Они характеризуются высокой неравномерностью сжатия. Поэтому грунты с органическими примесями совершенно непригодны в качестве естественных оснований.

6. Крупноблочные грунты. Крупноблочные полы называются фрагментами горных пород, которые не связаны друг с другом. В таких почвах преобладают фрагменты размером более 2 мм. К ним относятся гравий, галька и щебень. Если такие грунты не подвергаются воздействию эрозийной влаги и лежат плотным слоем, они хорошо подходят в качестве основы для строительства.

7. Лёсс. Лёсс относится к категории глиняных грунтов. Он состоит из однородной пористой мелкозернистой породы желтовато-светло-коричневого оттенка. В лёссе преобладают пыльные частицы. Одной из основных особенностей лёсса является наличие макропор, способствующих глубокому проникновению воды в почву. Из-за низкой водостойкости связей между частицами лёсс быстро намокает. Если здание построено на лёссовом фундаменте, грунт должен быть защищен от влаги.

8. Насыпные грунты. Такие грунты, как правило, формируются искусственно, например, при заполнении оврагов, прудов и т.д. Для насыпных грунтов характерно неравномерное сжатие, поэтому в качестве естественных оснований они практически не используются, за исключением рефлированных насыпных грунтов, то есть грунтов, образованных путем перекачки разжиженного грунта по трубопроводу землесосом.

9. Плывуны. Плывуны представляют собой разновидность супесей и других мелкозернистых грунтов, имеющих нестабильное, подвижное состояние. При разжижении плывуны становятся особенно подвижными и могут практически превращаться в жидкость. Плывуны малопригодны в качестве основания, однако современные методы строительства располагают технологиями борьбы с негативными свойствами плывунов.

## ФУНДАМЕНТЫ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ

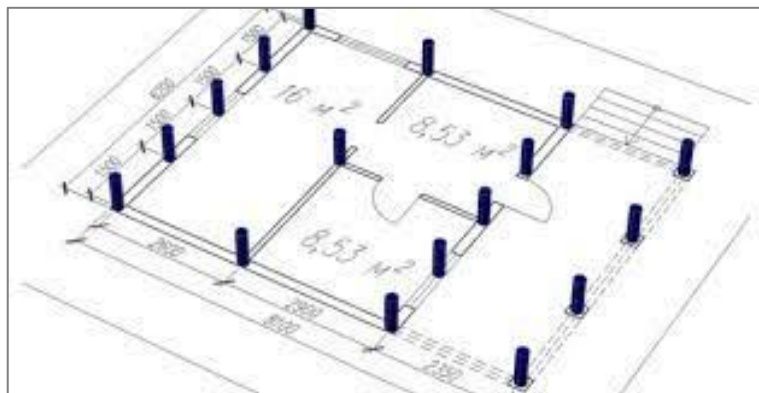
Далее необходимо определить типы фундаментов чаще всего используемые в строительстве высотных зданий. Чаще всего используются три вида несущих оснований: плитный, свайный, плитно-свайный фундаменты.

1. Плитный фундамент (рис.1) представляет собой монолитную конструкцию из железобетона или сборочный каркас. Такой тип фундамента хорош тем, что выдерживает большие нагрузки, на него не влияют движения грунтов. Также плитный фундамент можно использовать как основу для полов внутри сооружения, и он позволяет возводить здание в рельефе с высоким уровнем грунтовых вод, в болотистой местности. Из минусов выделяется высокая стоимость такого основания сооружения. Плитный фундамент может обойтись до 50% стоимости всех несущих конструкций сооружения. Из-за его монолитного строения весьма нецелесообразно заливать подобный вид фундамента на склонах, также его трудно заливать в период заморозков.

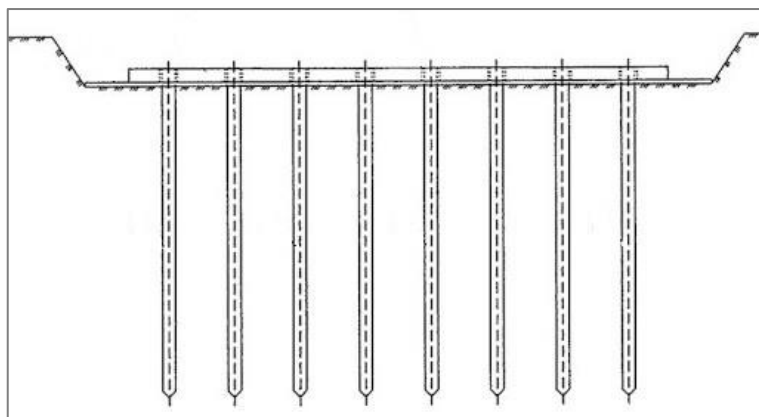


**Рис. 1.** Плитный фундамент  
**Fig. 1.** Slab foundation

2. Свайный фундамент (рис.2) представляет собой группу свай, углубленных в землю и объединенных ростверком. Такие фундаменты обладают рядом положительных свойств таких как: высокая устойчивость к разнонаправленным нагрузкам, высокая прочность и универсальность. Удобен для возведения домов с любыми грунтами, а также быстро монтируется. Но имеется также ряд минусов в использовании этого вида фундамента: необходимость проведения геодезических изысканий, сложность инженерных решений, возможность изменения свойств соседних грунтов и построек в силу использования на строительной площадке специальной техники для забивания свай. Чаще всего такой тип фундамента используется в зонах вечной мерзлоты.



**Рис. 2.** Свайный фундамент  
**Fig. 2.** Pile foundation



**Рис. 3.** Свайно-плитный фундамент  
**Fig. 3.** Pile-slab foundation



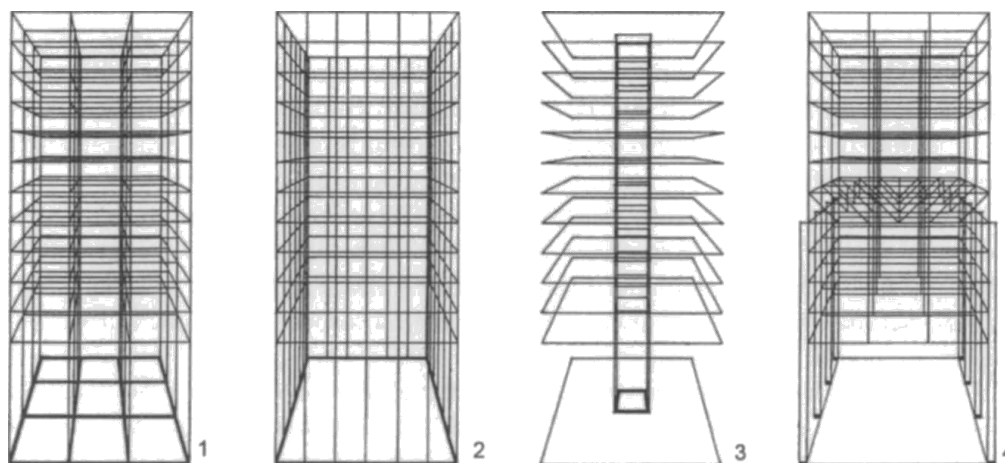
3. Свайно-плитный фундамент (рис.3) объединяет свойства двух предыдущих видов несущих конструкций. Очень дорогой в монтаже, необходима крупногабаритная техника, большие затраты на сбор всех необходимых изысканий, расчеты, и сложность инженерных решений. Но это один из ключевых видов фундамента в современном строительстве, ведь большинство высотных зданий построены именно на таком основании, ведь оно позволяет преодолевать столь объемным зданиям преграды в виде плохих грунтов, сейсмически опасных зон и огромный вес конструкций.

### КОНСТРУКЦИИ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ

При выборе конструкции высотного здания требуется огромное количество расчетов различных нагрузок. Рассмотрим основные особенности конструирования таких схем.

Вертикальные нагрузки. Для компенсации такого рода нагрузок необходима значительная площадь поперечных сечений опор, что ограничивает пригодное для использования пространство здания. Задача проектировщика в данном случае - уменьшение поперечного сечения элементов, передающих нагрузку. Высотная конструкция – «устойчивая по высоте» структура, которая осуществляет фокусирование и заземление нагрузки, состоящая из жестких элементов в вертикальном протяжении.

Существует четыре типа конструкций высотных сооружений: растровые, с оболочкой, ствольные, пролетные или мостовые (рис.4).



**Рис. 4.** Классификация несущих систем высотных зданий:

1 – Растровые, 2 – оболочковые, 3 – ствольные, 4 – мостовые

**Fig. 4.** Classification of load-bearing systems of high-rise buildings:

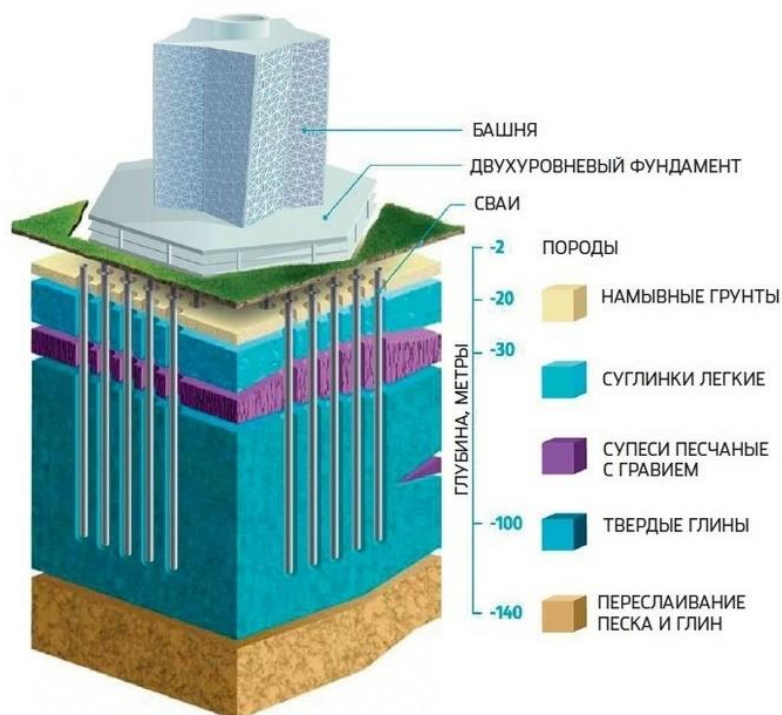
1 - Raster, 2 - shell, 3 - barrel, 4 - bridge

Горизонтальный нагрузки. Горизонтальные силы, образующиеся под действием ветра или землетрясения переходят в комплексные движения и деформации сооружения. Под воздействием горизонтальных сил проявляются следующие виды деформаций: изгиб, сдвиг, опрокидывание, наклон, преломление, кручение, колебания. Отдельно среди всех горизонтальных нагрузок стоят ветровые нагрузки [12]. В период появления первых «высоток» их высота к весу имело абсолютно иное соотношение. В наше время здания стали гораздо более высокими и при этом более гибкими и легкими. В силу этого наравне с вертикальным расчетом свою важность обрел расчет ветровых нагрузок. Воздействие ветра на здание определяется рельефом, планом градостроительной карты (находятся ли по близости высотные здания) и пространственной фигурой самого здания. Механические (динамические) гасители колебаний в зависимости от конструктивной схемы подразделяются на три типа: пружинные (с гибким элементом), маятниковые и комбинированные. В настоящее время в высотных сооружениях используют маятниковые и комбинированные гасители колебаний. Принцип действия демпфера колебаний можно сравнить с маятниковым движением массы, подвешенной на конце стержня. Маятник движется в противофазе к колебаниям стержня и уменьшает его отклонение.

### ФУНДАМЕНТ БАШНИ ЛАХТА ЦЕНТРА В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ

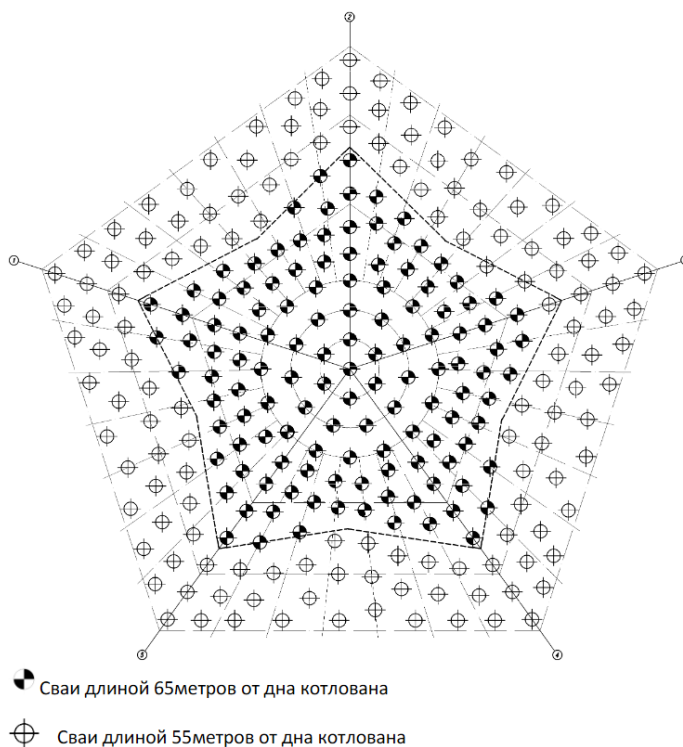
Рассмотрим для примера фундамент башни Лахта Центра в г. Санкт-Петербург - самого высокого здания Европы [13]. Башня имеет свайно-плитный фундамент (рис.5). В процессе проектирования

сооружения инженеры столкнулись с рядом серьезных проблем. Верхний слой грунтов оказался слабонесущей глиной, по причине этого пришлось использовать именно свайно-плитный тип фундамента. Твердые глиняные грунты начались только с глубины более 20 метров, скальные – более 100.



**Рис. 5.** Грунты под зданием Лахта Центр  
**Fig. 5.** Soil under the building Lakhta Center

Было принято решение использовать 264 буронабивные сваи на глубине более 70 метров. Диаметр свай составляем порядка 2 метров, шаг 2–3 диаметра сваи.



**Рис. 6.** План свайного основания башни Лахта Центр  
**Fig. 6.** The plan of the pile foundation of the Lakhta Center tower

При создании фундамента башни Лахта Центра использовали технологии высотного строительства, приспособленные к питерским грунтам.

Подземные этажи башни конструктивно образуют коробчатый фундамент, который равномерно распределяет нагрузку от ядра башни на свайное основание. Чтобы сделать коробчатый фундамент по сути в воде, было принято решение по всему периметру здания возвести из железобетона «стену в грунте» на глубину около 30 м. Она изолировала весь котлован. Впоследствии «стена в грунте» послужит дополнительной защитой подземной части здания от грунтовых вод.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Активное строительство высотных зданий и сооружений ведет к быстрому технологическому прогрессу в этой области. Проекты, которые 20 лет назад казались, практически невозможными сегодня становятся реальностью. За последние 70 лет методы возведения строительства уникальных зданий усовершенствовались настолько, что первое здание, которое преодолет высотную отметку в 1000 метров, Kingdom Tower, которое проектируется в Саудовской Аравии, уже не кажется чем-то особенным. На данный момент свайно-плитный фундамент является единственным техническим решением, способным не только выдерживать продольные нагрузки веса здания, но и продольные нагрузки грунтов, сейсмические нагрузки, поперечные и др.

Таким образом, можно сказать, что строительство зданий таких объемов требует как длительных подготовительных работ, так и сложнейших расчетов нагрузок на конструкции, что, в свою очередь, требует использования самых оптимальных конструктивных и технических решений [14-18].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жорник М.А., Гамаюнова О.С. Высокоскоростное строительство высотных зданий // Высокие технологии в строительном комплексе. 2021. № 1. С. 115-123.
2. Musorina T.A., Gamayunova O.S., Petrichenko M.R. Thermal regime of enclosing structures in high-rise buildings // Vestnik MGSU. 2018. Т. 13. № 8 (119). С. 935-943.
3. Gamayunova O., Spitsov D. Technical features of the construction of high-rise buildings // В сборнике: E3S Web of Conferences. Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE 2019. 2020. С. 08008.
4. Gamayunova O., Petrichenko M., Musorina T., Gumerova E. Feasibility study of the insulation of the enclosing walls of high-rise buildings // В сборнике: MATEC Web of Conferences. Сер. "International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering, EECCE 2018" 2018. С. 06006.
5. Корнилов Ю.Н., Царёва О.С. Совершенствование методики наблюдений за деформациями зданий и сооружений // Геодезия и картография. 2020. Т. 81. № 4. С. 9-18.
6. Перминов Е.А., Царёва О.С. Подготовка чертежей для разбивочных работ // В сборнике: Неделя науки ИСИ. Материалы всероссийской конференции в 3-х частях. Инженерно-строительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Санкт-Петербург, 2021. С. 288-290.
7. Tsareva O., Portnov F. Improving the methodology for observing deformations of buildings and structures // В сборнике: E3S Web of Conferences. 2018 International Science Conference on Business Technologies for Sustainable Urban Development, SPbWOSCE 2018. 2019. С. 01056.
8. Кашин Г.И., Павлова Л.С., Олехнович Я.А. Анализ методик выноса осей зданий и сооружений // В сборнике: Неделя науки ИСИ. Материалы всероссийской конференции в 3-х частях. Инженерно-строительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Санкт-Петербург, 2021. С. 171-174.
9. Царёва О.С. Оценка точности определения координат деформационных марок и расстояний между ними // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2019. № 2. С. 49-56.
10. Табаченко А.А., Олехнович Я.А. Обработка плотного облака точек при геоинформационном моделировании зданий и сооружений промышленного и гражданского строительства // В сборнике: Неделя науки ИСИ. Материалы всероссийской конференции в 3-х частях. Инженерно-строительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Санкт-Петербург, 2021. С. 67-70.
11. Царёва О.С. Определение векторов смещений марок по изменениям расстояний с использованием метода наименьших квадратов // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2020. Т. 64. № 5. С. 499-506.
12. Lalin V., Galyamichev A., Zdanchuk E., Mutovkin A., Dogru S. Wind loads on a high-rise building // Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. Т. 70. С. 551-562.
13. Sviridenko V., Novik A., Jos V. The concept of a footbridge, that leading to the Lakhta Center // AlfaBuild. 2019. № 1 (8). С. 27-36.
14. Sergeev V.V., Petrichenko M.R., Nemova D., Kotov E.V., Tarasova D.S., Nefedova A.V., Borodinecs A. The building extension with energy efficiency light-weight building walls // Magazine of Civil Engineering. 2018. № 8 (84). С. 67-74.

15. Кибирева Ю.А., Астафьева Н.С. Применение конструкций из сталежелезобетона // Экология и строительство. 2018. № 2. С. 27-34.

16. Le T.Q.T., Vavilova A. A method of accounting for higher vibration modes in structural dynamics problems // Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. Т. 70. С. 479-490.

17. Булатов Г.Я., Костюкова А.Ю. Новые технологии фундаментостроения для высотных зданий // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2008. № 4 (63). С. 227-233.

18. Миропольский П.С. Особенности остекления высотных зданий // Инженерные исследования. 2021. № 2 (2). С. 24-30.

#### ОБ АВТОРАХ

**Никита Витальевич Шлафман** – студент специалитета. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: shlafman.nv@edu.spbstu.ru

#### ABOUT THE AUTHORS

**Nikita V. Shlafman** – student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St. Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: shlafman.nv@edu.spbstu.ru