



УДК: 624.152  
DOI: 10.52409/20731523\_2022\_3\_6  
EDN: ESCYYW



## Оценка влияния устройства глубокого котлована на дополнительные осадки зданий окружающей застройки

Илизар Т. Мирсаяпов<sup>1</sup>, Н.Н. Айсин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский государственный архитектурно-строительный университет  
г. Казань, Российская Федерация

**Аннотация.** *Постановка задачи.* В условиях плотной городской застройки проектирование и строительство новых объектов все чаще осуществляется в непосредственной близости к существующим зданиям, что требует разработки модели для расчета деформаций оснований зданий в единой системе с фундаментами, основанием и окружающим грунтом.

Целью данной работы являлась оценка влияния устройства котлована глубиной 13 м без крепления стенок рядом с существующим зданием на осадки основания. Для этого необходимо было оценить характер влияния устройства глубокого котлована на существующее здание и разработать расчетную модель для определения деформаций основания здания с учетом совместного деформирования системы «надземная и подземная части здания – фундамент – грунтовое основание».

*Результаты:* Комплексное моделирование напряженно-деформированного состояния и выполненные численные исследования позволили установить, что устройство глубокого котлована привело к одновременному вертикальному и горизонтальному перемещению грунтов основания фундаментов здания 30.1 мм и 19.8 мм соответственно. Возникло множество линий сдвига грунтового массива под фундаментами, свидетельствующих о достижении первого предельного состояния оснований фундаментов. Устройство глубокого котлована привело к чрезмерному и дополнительному деформированию фундаментов, крену фундаментов и здания в целом, а так же к усилиям в конструкциях выше предельно допустимых.

*Выводы:* Значимость разработанной модели основания для строительной отрасли состоит в том, что она позволяет определять осадку оснований фундаментов с учетом режимов нагружения.

**Ключевые слова:** осадка основания, глубокий котлован, окружающая застройка, режим нагружения, расчетная модель.

**Для цитирования:** Мирсаяпов Илизар Т., Айсин Н.Н. Оценка влияния устройства глубокого котлована на дополнительные осадки зданий окружающей застройки // Известия КГАСУ. 2022. № 3 (61), с.6-13, DOI:10.52409/20731523\_2022\_3\_6, EDN: ESCYYW

# Assessment of the deep excavation effect on additional settlement of surrounding buildings

Ilizar T. Mirsayapov<sup>1</sup>, N.N. Aysin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kazan State University of Architecture and Engineering  
Kazan, Russian Federation

**Abstract:** *Problem statement:* In restrained urban conditions the design and construction of new facilities is increasingly carried out in close proximity to existing buildings, which requires the development of a model for calculating the deformations of building foundations in a single system with foundations, basement and surrounding soil.

The purpose of this work was to assess the impact of the excavation of a pit with a depth of 13 m next to an existing building without a protective fence. To do this, it is necessary to assess the influence of the deep excavation on the existing building and develop a calculation model for determining the deformations of the building foundation considering joint deformation in the system of superstructure and substructure - foundations - subgrade.

*Results:* Complex modeling of the stress-strain state and numerical studies have made it possible to establish that the construction of a deep excavation led to simultaneous vertical and horizontal movement of the soils of the building foundation base 30.1 mm and 19.8 mm, respectively. There were a lot of shifting lines of the soil mass under the foundations, indicating the achievement of the first limit state of the foundations bases. The construction of a deep excavation led to excessive and additional deformation of the foundations, the tilt of the foundations and the building as a whole, as well as to the stress in the structures above the maximum permissible.

*Conclusions:* The significance of the developed foundation model for the construction industry lies in the fact that it allows you to determine foundations settlement, taking into account the loading modes.

**Keywords:** foundation settlement, deep pit, surrounding buildings, loading mode, design model.

**For citation:** Mirsayapov Ilizar T., Aysin N.N. Assessment of the deep excavation effect on additional settlement of surrounding buildings.// News KSUAE, 2022 №3 (61), p.6-13, DOI:10.52409/20731523\_2022\_3\_6, EDN: ESCYYW

## 1. Введение

В связи с ростом плотности застройки городов все чаще происходит проектирование и строительство объектов настолько близко к существующим зданиям, что без специальных мероприятий по защите существующей застройки проводить работы становится невозможным, либо опасным [1-3]. Необходимо наблюдать, а также верно прогнозировать изменение технического состояния зданий, попадающих в зону влияния строительства или реконструкции, для этого составляется специальная программа по геотехническому мониторингу. При прогнозе технического состояния необходимо учитывать изменение распределения усилий в конструктивных элементах здания вследствие дополнительных (технологических и силовых) осадок фундаментов [4-7], для этого необходимо верно моделировать работу грунтового основания. Для точного прогноза картины деформирования основания модель основания должна учитывать изменения напряженно-деформированного состояния массива грунта под зданием, а также режим нагружения основания [8-11] (время, скорость нагружения, разгрузку, изменение направления действия суммарного напряжения).

В зависимости от категории технического состояния существующих зданий допустимые дополнительные осадки зданий составляют 20-50 мм.

В связи с этим возникает необходимость ограничения вертикального и горизонтального перемещения грунтов основания фундаментов существующих зданий. Для ограничения вертикальных и горизонтальных перемещений грунта оснований за пределами котлована устраиваются различные варианты ограждения котлованов. Эти

вопросы рассмотрены в работах [12-15]. Целью данной работы является оценка влияния устройства котлована глубиной 13 м без крепления стенок рядом с существующим зданием на дополнительные осадки основания. Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Оценить характер влияния устройства глубокого котлована на существующее здание.
2. Разработать расчетную модель для расчета деформаций основания здания в системе с фундаментами, основанием и окружающим грунтом.

## 2. Материалы и методы

Исследуемое здание трехэтажное с неполным каркасом из сборного железобетона, с подвальным этажом и с двумя пристроями, расположено в осях 9-15/А-Г, имеет размеры в плане 36х36 м.

Фундаменты основной части здания столбчатые с размером подошвы 2.0х2.0 м, глубиной заложения - 4.15 м, под несущими стенами – сборные железобетонные ленточные.

Согласно результатам изысканий, в геологическом строении участка (на вскрытую скважинами глубину) принимают участие аллювиально-делювиальные четвертичные отложения и верхнепермские элювиальные отложения, перекрытые с поверхности толщей техногенных отложений четвертичного возраста.

С поверхности до изученной глубины 25.0 м геолого-литологическое строение представлено следующими инженерно-геологическими элементами (ИГЭ):

ИГЭ-1. Насыпной грунт, состоящий из смеси чернозема, щебня, песка и гравия. Залегает с поверхности до глубины 0.2-1.1 м.

ИГЭ-2. Суглинок твердый, коричнево-красный, легкий, среднедеформируемый, низкой прочности, ненабухающий, водонепроницаемый, незасоленный, быстро и очень быстро размокаемый, известковистый, мощностью от 9.3 до 13.1 м. Залегает в интервале глубин 0.4-14.3 м.

ИГЭ-3. Суглинок тугопластичный, коричнево-красный, тяжелый, среднедеформируемый, низкой прочности, ненабухающий, водонепроницаемый, незасоленный, быстро и очень быстро размокаемый, известковистый, с прослоями и гнездами песка, мощностью от 1.3 до 4,5 м. Залегает в интервале глубин 9.7-17.4 м.

ИГЭ-4. Глина верхнепермская, элювиальная, твердая, красновато-коричневая, комковатая, трещиноватая, легкая, среднедеформируемая, средней прочности, ненабухающая, водонепроницаемая, незасоленная, медленно и быстро размокаемая, известковистая, с тонкими прослойками алевролита, мощностью от 3.4 до 7.2 м. Залегает в интервале глубин 17.0-25.0 м.

ИГЭ-5. Песчаник верхнепермский, элювиальный, желтовато-коричневый, низкой прочности, водонепроницаемый, сильновыветрелый, размягчаемый, сильнопористый, водонасыщенный, мощностью от 2.8 до 4.5 м. Залегает в интервале глубин 14.0-20.9 м.

В целом геолого-литологическое строение площадки характеризуется относительной выдержанностью грунтов по площади и глубине, неоднородностью их состава и состояния. Физико-механические характеристики грунтов оснований фундаментов приведены в таблице.

Таблица

Физико-механические характеристики грунтов

№ ИГЭ	Плотность при природной влажности, т/м <sup>3</sup>	Коэффициент пористости	Модуль деформации, МПа	Угол внутреннего трения при $\alpha=0,95$ , град	Удельное сцепление расчетное при $\alpha=0,95$ , кПа
	$\rho$	$e$	$E$	$\phi$	$C$
2	1.91	0.76	15.1	21	32
3	1.88	0.842	13.1	19	25
4	1.88	0.857	25.2	21	46
5	1.91	0.617	37.8	35	0

Расчет напряжений и деформаций грунтового основания фундаментов здания производился с использованием программного комплекса ЛИРА-САПР 2014, реализующего метод конечных элементов в перемещениях. Для расчетов было создано два типа расчетных моделей: трехмерная и плоская. Вертикальные несущие элементы здания (железобетонные колонны) и горизонтальные несущие элементы (железобетонные ригели) моделировались стержневыми элементами. Для моделирования плит перекрытий в трехмерной модели использовались конечные элементы оболочки, при расчетах в плоской постановке плиты перекрытия моделировались стержневыми конечными элементами. Для полноценной оценки напряженно-деформированного состояния всего здания в целом, а также отдельных элементов моделировалась система «грунтовое основание – фундамент – надземная часть здания». Работа грунта учитывалась через коэффициенты постели  $C_1$  и  $C_2$ . Расчет жесткостей этих элементов рассчитывалась в зависимости от расположения, напряженно-деформированного состояния основания и режимов нагружения по модифицированному методу Пастернака:

$$C_1 = \frac{E_1(t, \tau)}{H_C(1 - 2\mu_{gr})}, \quad (1)$$

$$C_2 = \frac{E_1(t, \tau)}{\sigma(1 + \mu_{gr})}, \quad (2)$$

где  $H_C$  – глубина сжимаемой толщи;

$\mu_{gr}$  – коэффициент Пуассона грунта;

$E_1(t, \tau)$  – модуль общих деформаций грунта основания с учетом изменения по глубине сжимаемой толщи и режимов нагружения:

$$E_1(t, \tau) = \frac{H_C}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{u_i E_{1i}(t, \tau)}}, \quad (3)$$

где  $h_i$  – толщина  $i$ -го слоя грунта;

$u_i$  – поправочный коэффициент модуля деформаций для  $i$ -го слоя грунта;

$E_{1i}(t, \tau)$  – модуль общих деформаций грунта на каждом  $i$ -том слое с учетом изменения режимов нагружения вычисляется по формуле:

$$E_{1i}(t, \tau) = \frac{\Delta\sigma_{1i}(t, \tau)}{\Delta\varepsilon_{1i}(t, \tau)}, \quad (4)$$

где  $\Delta\sigma_{1i}(t, \tau)$ ,  $\Delta\varepsilon_{1i}(t, \tau)$  – приращения вертикальных напряжений и деформаций при трехосном режимном нагружении, принимается в соответствии с [16].

### 3. Результаты и обсуждение

В соответствии с общей концепцией реконструкции в непосредственной близости от здания, на расстоянии 4 м продольных и поперечных стен запроектирована и устроена подземная парковка в глубоком котловане с глубиной 13-15 м без крепления стенок.

До устройства глубокого котлована вдоль осей А, 9 и 15 внешние признаки чрезмерных и неравномерных осадок оснований фундаментов не установлены. Техническое состояние оснований фундаментов, фундаментов, несущих элементов каркаса и здания в целом оценивается как работоспособное.

Устройство глубокого котлована с глубиной 13 м с вертикальными стенками без надлежащего крепления в непосредственной близости от здания со стороны осей А, 9 и 15 (со стороны оси А котлован вплотную подходит к стене здания) вызвало горизонтальное перемещение грунтов основания фундаментов. Появились признаки деформаций железобетонного каркаса здания между осями А-В вследствие

дополнительной осадки основания фундаментов колонн каркаса здания из-за горизонтального перемещения стенок глубокого котлована, что привело к одновременному вертикальному и горизонтальному перемещению грунтов за пределами глубокого котлована, т.е. основания фундаментов здания. В бетонном полу подвального этажа появилась трещина вдоль стены по оси А с шириной раскрытия до 6 мм на расстоянии 1 м от внутренней поверхности стены по оси А, при этом вертикальное перемещение пола в зоне стены составило около 20 мм. Также появились трещины с раскрытием до 1 мм в межплитных швах перекрытия подвала и вертикальные трещины с раскрытием до 0.5 мм в опорной зоне ригеля перекрытия подвала (между осями А-В). В дальнейшем эти дефекты получили большее развитие и появились другие дефекты, что свидетельствует о продолжении развития деформаций грунтового основания фундаментов здания. Техническое состояние оснований фундаментов и здания в данный момент является труднопрогнозируемым и требует проведения исследований с учетом развития дополнительных деформаций грунтов в котловане и за его пределами.

В связи с этим были проведены численные исследования напряженно-деформированного состояния грунтов основания фундаментов рассматриваемого здания с учетом влияния глубокого котлована и подземной парковки с использованием модифицированной расчетной модели Пастернака на основе аналитической расчетной модели грунта при трехосном режимном нагружении [16].

Комплексное моделирование напряженно-деформированного состояния и выполненные численные исследования позволили установить, что устройство глубокого котлована с глубиной 13.0 м с вертикальными стенками без надлежащего крепления в непосредственной близости от здания привело к одновременному вертикальному и горизонтальному перемещению грунтов основания фундаментов здания 30.1 мм и 19.8 мм соответственно. Осадки основания фундаментов составили 22 мм. Возникло множество линий сдвига грунтового массива под фундаментами (Рис. 1), свидетельствующих о достижении первого предельного состояния оснований фундаментов в осях А-В. Таким образом, устройство глубокого котлована привело к чрезмерному и дополнительному деформированию фундаментов, крену фундаментов и здания в целом. Относительная разность осадок оснований фундаментов:

$$-0.0021 > \left[ \frac{\Delta S}{L} \right]_{ult} = 0.001, \quad (5)$$

где  $L$  – расстояние между рассматриваемыми точками;

$\Delta S$  – абсолютная разность осадок рассматриваемых точек.

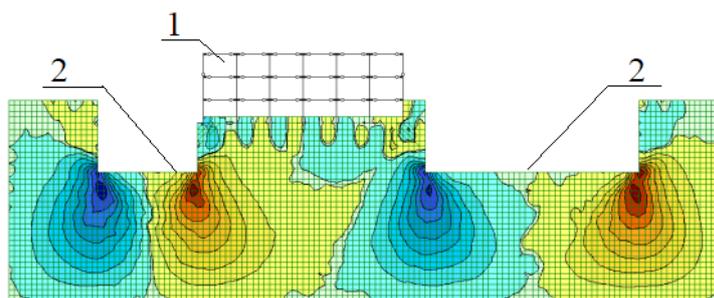


Рис. 1. Эпюра касательных напряжений в грунте основания (иллюстрация авторов). 1- каркас здания; 2 – глубокий котлован

Fig. 1. Plot of tangential stresses in the ground of the base (illustration by the authors), 1- building frame; 2 – deep pit

Дополнительные осадки основания фундаментов определяются по формуле:

$$S_{ad} = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_1(t, \tau)}{E_{1i}(t, \tau)} h_i, \quad (6)$$

Возведение трехэтажной подземной парковки в глубоком котловане привело к дальнейшему ухудшению геотехнической ситуации:

- увеличились вертикальные и горизонтальные перемещения грунтов в основаниях фундаментов до 42.5 мм и 23.7 мм (рис. 2, 3);
- зона первого предельного состояния оснований фундаментов распространилась в осях А-Д, 9-15;
- усилия в несущих элементах каркаса увеличились до 60%.

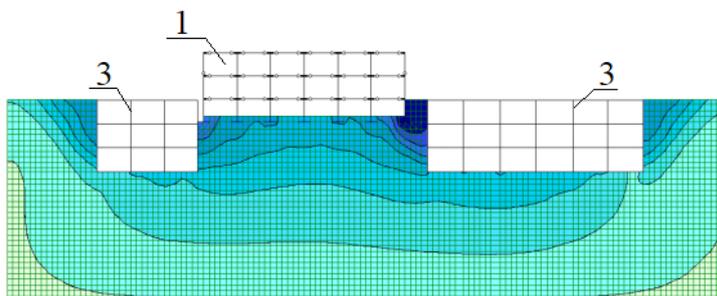


Рис. 2. Эпюра вертикальных перемещений грунтов основания здания (иллюстрация авторов): 1 – каркас здания; 3 – подземный паркинг  
 Fig. 2. Plot of vertical displacements of the foundation of the building (illustration by the authors): 1 – building frame; 3 – underground parking

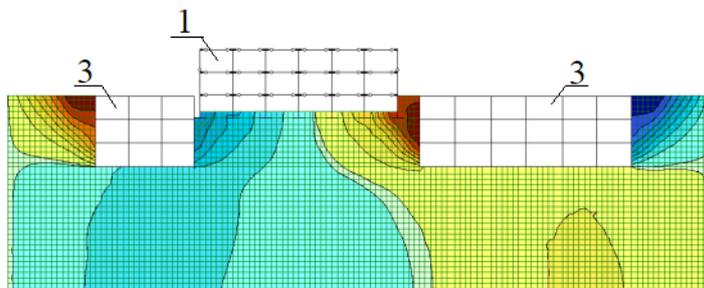


Рис. 3. Эпюра горизонтальных перемещений грунтов основания здания (иллюстрация авторов): 1 – каркас здания; 3 – подземный паркинг  
 Fig. 3. Plot of horizontal movements of the building foundation soils (illustration by the authors): 1 – building frame; 3 – underground parking

Результаты геотехнического мониторинга несущих конструкций каркаса, грунтовых оснований, междуэтажных перекрытий в течение 4-х месяцев подтвердили результаты численных исследований.

Установлено, что имевшиеся к моменту начала наблюдения дефекты получили дальнейшее развитие. Ширина раскрытия трещины в бетонном полу подвала вдоль стены по оси А увеличилась до 9 мм, трещины в межплитных швах перекрытия подвала образовывались в пределах всего подвального этажа и ширина раскрытия трещин увеличилась до 1.5 мм. Вертикальные трещины в ригелях перекрытия в зоне опирания на консоли колонны образовались на всех ригелях перекрытия подвального этажа и ширина раскрытия этих трещин увеличилась до 1.0 мм.

Кроме получивших развитие имеющихся дефектов, образовались и получили развитие новые дефекты и повреждения:

- в бетонном полу подвала на расстоянии 1.5 м от существующей трещины образовалась новая трещина с шириной раскрытия до 5 мм, затем другие трещины с шагом 1.5-2.5 м вдоль буквенных осей и с шагом 2.0-2.5 м вдоль цифровых осей с раскрытием до 3.0-4.5 мм;

- горизонтальные трещины с шириной раскрытия до 0.5-0.7 мм в зоне сопряжения закладных деталей консоли колонны и ригеля перекрытия подвального этажа;

- вертикальные трещины шириной раскрытия до 1.0-1.5 мм в стенах по осям 9 и 15 подвального и первого этажей, шаг трещин составляет 1.5-2.0 м.

Вышеописанное свидетельствует о продолжающихся чрезмерных дополнительных деформациях грунтового основания фундаментов и, как следствие, о дополнительных непроектных деформациях каркаса здания.

#### 4. Заключение

1. Устройство глубокого котлована с глубиной 13 м с вертикальными стенками без надлежащего крепления в непосредственной близости от здания привело к чрезмерному и дополнительному деформированию фундаментов и крену здания в целом, к деформированной схеме работы каркаса, что отличается от проектной. Техническое состояние здания оценивается как аварийное.

2. Разработана расчетная модель здания с учетом совместного деформирования системы «надземная и подземная части здания – фундамент – грунтовое основание». Выполненные численные исследования на основе расчетной модели показали, что устройство глубокого котлована с глубиной 13 м привело к одновременному вертикальному и горизонтальному перемещению грунтов основания фундаментов здания. Возникло множество линий сдвига грунтового массива под фундаментами. Результаты геотехнического мониторинга в течение 4-х месяцев подтвердили результаты численных исследований.

#### Список литературы / References

1. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Long-term settlements assessment of high-rise building groundbase based on analytical ground deformation diagram // *Procedia Engineering*. 2016. P. 519-527. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.728.
2. Mirsayapov I. T. Koroleva I. V. Strength and Deformability of Clay Soil Under Different Triaxial Load Regimes that Consider Crack Formation // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2016. Vol. 53. No 1. P. 5-11. DOI 10.1007/s11204-016-9356-x.
3. Li Q., Liu M., Lu Z., Deng X. Creep Model of High-Strength High-Performance Concrete Under Cyclic Loading // *J. Wuhan Univ. Technol. Sci. Ed.* 2019. №3 (34). P. 622–629. DOI: 10.1007/s11595-019-2096-9.
4. Chen P., Zhou X., Zheng W., Wang Y., Bao B. Influence of high sustained loads and longitudinal reinforcement on long-term deformation of reinforced concrete beams // *J. Build. Eng.* 2020. № 30. DOI: 10.1016/j.jobee.2020.101241.
5. Bouziadi F., Boulekbache B., Haddi A., Hamrat M., Djelal C. Finite element modeling of creep behavior of FRP-externally strengthened reinforced concrete beams // *Eng. Struct.* 2020. №204. P. 109908. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109908.
6. Koroleva I. V. Assessment of clay soils strengthening under triaxial cyclic loading // *E3S Web of Conferences Volume 274 (2021): 2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE - 2021), Kazan, 21–28 April 2021. France: EDP Sciences, 2021. Vol. 274. P. 3025. DOI 10.1051/e3sconf/202127403025.*
7. Song L., Fan Z., Hou J. Experimental and Analytical Investigation of the Fatigue Flexural Behavior of Corroded Reinforced Concrete Beams // *Int. J. Concr. Struct. Mater.* 2019. №1(13). DOI: 10.1186/s40069-019-0340-5.
8. Zamaliev F. S., Zakirov M. A. Stress-strain state of a steel-reinforced concrete slab under long-term // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. P. 12–23.
9. Tang H., Chen Z., Avinesh O., Guo H., Meng Z., Engler-Pinto C., Kang H. Notch Insensitivity in Fatigue Failure of Chopped Carbon Fiber Chip-Reinforced Composites Using Experimental and Computational Analysis // *Compos. Struct.* 2020. №10(16). P. 112280. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112280.
10. Choe G., Shinohara Y., Kim G., Lee S., Lee E., Nam J. Concrete corrosion cracking and transverse bar strain behavior in a reinforced concrete column under simulated marine conditions // *Appl. Sci.* 2020. №5(10). DOI:10.3390/app10051794.
11. Gambarelli S., Ožbolt J. Interaction between damage and time-dependent deformation of mortar in concrete: 3D FE study at meso-scale // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2019. № 615. P. 012013. DOI:10.1088/1757-899X/615/1/012013.
12. Auggaard E., Ferrier E., Michel L. Mechanical behavior of timber-concrete composite members under cyclic loading and creep // *Eng. Struct.* 2020. №210. P. 110289. DOI:

- 10.1016/j.engstruct.2020.110289.
13. Trekin N. N., Kodysh E. N., Mamin A. N., Trekin D. N., Onana J. Improving methods of evaluating the crack resistance of concrete structures // American Concrete Institute, ACI Special Publication. 2018. № 326. P. 93.1–93.6.
14. Liang J., Nie X., Masud M., Li J., Mo Y. L. A study on the simulation method for fatigue damage behavior of reinforced concrete structures // Eng. Struct. 2017. № 150, P. 25–38. DOI:10.1016/j.engstruct.2017.07.001
15. Zhang G., Zhang Y., Zhou Y. Fatigue Tests of Concrete Slabs Reinforced with Stainless Steel Bars // Adv. Mater. Sci. Eng. 2018. P. 1-5.
16. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Changes in physical and mechanical characteristics of soil under triaxial loading // Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations : Proceedings of the International Conference on Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations, GFAC 2019, Saint petersburg, 06–08 February 2019. – Saint petersburg: Taylor & Francis Group, 2019. – P. 193-196. – DOI 10.1201/9780429058882-37.

#### **Информация об авторах.**

**Илизар Талгатович Мирсаяпов**, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: mirsayapov1@mail.ru

**Нияз Наилевич Айсин**, аспирант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: zarejay@kgasu.ru

#### **Information about the authors.**

**Pizar T. Mirsayapov**, Doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: mirsayapov1@mail.ru

**Niyaz N. Aysin**, postgraduate student, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: zarejay@kgasu.ru