



УДК 69.07

DOI 10.25628/UNIIP.2024.61.2.011

ЗУБРИЦКИЙ М.А., УШАКОВ О.Ю., САБИТОВ Л.С., АЛЁХИН В.Н.

Влияние типа фундамента на расчетную сейсмичность площадки строительства

**Зубрицкий
Максим
Александрович**

кандидат технических наук, Уральский государственный архитектурно-художественный университет им. Н.С. Алферова (УрГАХУ), Проектный центр, главный инженер проектов, Екатеринбург, Российская Федерация

e-mail:
zubrickiy_maksim@mail.ru



**Ушаков
Олег
Юрьевич**

кандидат технических наук, доцент, Институт строительства и архитектуры, Уральский федеральный университет (УрФУ), Екатеринбург, Российская Федерация

e-mail:
ushakovoleg@yandex.ru



**Сабитов
Линар
Салихзанович**

доктор технических наук, доцент, Институт дизайна и пространственных искусств, ФГБОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», Казань, Российская Федерация

e-mail: l.sabitov@bk.ru

Авторами выполнен ряд численных экспериментов, в рамках которых рассматривались полностью идентичные сооружения на идентичных грунтовых условиях, но с разными типами фундаментов. Анализ выполненных расчетов показал значительное расхождение отклика сооружений при сейсмических воздействиях для разных типов фундаментов. Они объясняются диссипативными свойствами массива грунта, за счет которых снижается интенсивность сейсмического воздействия. Для уточнения интенсивности сейсмического воздействия необходимо разработать систему учета влияния типа фундамента при проведении инженерных изысканий.

Ключевые слова: сейсмическое воздействие, математическое моделирование, свайный фундамент, фундамент на естественном основании, прямой динамический метод, грунтовые условия, микросейсмо-районирование.

*Zubritsky M. A., Ushakov O. Yu., Sabitov L. S., Alekhin V. N.
Foundation type influence on the construction site seismicity*

In the research, a math modelling experiments for completely identical structures, but with different foundations types on identical soil conditions, were performed. The performed calculations analysis showed a significant discrepancy in the structures response under seismic impact for different foundations types. They are explained by the soil dissipative properties that lead to the seismic impact reduce. To clarify the seismic impact intensity, it is necessary to develop a system for taking into account the foundation type influence during engineering surveys.

Keywords: seismic impact, math modelling, pile foundation, time history analysis, direct foundation, soil conditions, microseismic zoning.



**Алёхин
Владимир
Николаевич**

кандидат технических наук, заведующий кафедрой САПРОС, Институт строительства и архитектуры, Уральский федеральный университет (УрФУ), Екатеринбург, Российская Федерация

e-mail: referetsf@yandex.ru

Введение

Анализ последствий сильных землетрясений показал множество примеров различных повреждений зданий и сооружений одинаковых конструктивных схем, расположенных в различных инженерно-геологических условиях [3; 6]. Современная нормативная документация связывает интенсивность сейсмического воздействия с плотностью и водонасыщенностью грунта. Данная зависимость получена на основании многолетних наблюдений последствий сильных землетрясений.

Например, часть зданий и сооружений после землетрясения в 1964 г. в г. Ниигата (Япония) выдержали сейсмическое воздействие, но были значительно повреждены в результате разрушения естественных оснований (Иллюстрация 1). Из-за уплотнения песков примерно треть территории города потерпела резкие опускания, местами достигающие двух метров.

После землетрясения на Аляске в том же 1964 г. сильно пострадал город Анкоридж, находящийся в 130 км от эпицентра землетрясения, а города Вальдиз и Сьюард были подвержены меньшим разрушениям, хотя их удаление от эпицентра тождественно. Причиной разрушений является значительная толща неустойчивых тиксотропных глин, складывающихся основание в районе Анкориджа. Данные грунты подвержены структурным

изменениям при динамических воздействиях.

К сожалению, при расчетах объемных моделей со множеством нагружений весьма трудно выполнить расчет совместно с грунтовым основанием в явном виде (объемная модель грунта) [2; 4; 11–14] как с позиций машиноемкости, так и с позиции создания таких моделей. В рамках аудита технической документации авторы отмечают распространенность следующего подхода при формировании расчетных схем: расчет несущего остова здания или сооружения на сейсмические воздействия выполняется отдельно от основания либо с заданием грунтового массива через коэффициенты постели. Данные подходы не позволяют оценить реальное напряженно-деформированное состояние массива грунта, что в дальнейшем может привести к последствиям, аналогичным землетрясениям в Анкоридже и Ниигате.

При выполнении микросейсморайонирования расчетная сейсмичность площадки строительства уточняется в зависимости от сейсмической жесткости грунта основания и скорости поперечных волн. Согласно Таблице 4.1 для грунтов I категории расчетная сейсмичность площадки может быть понижена на 1 балл, а для IV категории — наоборот, повышена.

Такое стремление текущих норм обеспечить «запас» при проектировании на слабых грунтах вполне резонно, но отражает ли данное допущение фактический отклик системы при землетрясениях? Учитываются ли диссипативные свойства слабых грунтов при сейсмических воздействиях? Правильно ли снижать расчетную сейсмичность площадки строительства для грунтов I категории? И влияет ли выбор фундамента на общий отклик системы при землетрясении?

Материалы и методы

Численное моделирование сейсмического воздействия прямым динамическим методом [10; 15–16] выполнено в программном комплексе Plaxis 2D [5; 7].

Объектом исследования является четырехъярусная плоская этажерка шириной 10 м и высотой 12 м (этаж — 3 м). Фундамент принят толщиной 600 мм, остальные конструкции — 300 мм. Материал конструкций — бетон В25. Модель материала — упругая. Демпфирование в конструкциях учтено с помощью уравнения Рейля.

Таблица 1. Физико-механические характеристики грунтов

Параметр	Обозначение	Верхний слой	Средний слой	Нижний слой	Ед. изм.
Модель материала	—	HS small	HS small	Linear Elastic	—
Тип поведения материалов	—	Drained	Drained	Drained	—
Мощность	h	4	7	2	м
Удельный вес	γ	18,2	21,4	25,5	кН/м ³
Коэффициент пористости	e_{int}	0,5	0,5	0,184	—
Модуль упругости	E	5000	12000	$30 \cdot 10^6$	кН/м ²
Модуль сдвига	G	—	—	$12,5 \cdot 10^6$	кН/м ²
Коэффициент Пуассона	ν	0,35	0,35	0,2	—
Коэффициент Пуассона при разгрузке/повторном нагружении	ν_{ur}	0,2	0,2	—	—
Секущая жесткость при стандартном трехосном испытании	E_{50}^{ref}	50000	12000	—	кН/м ²
Касательная жесткость для первичной нагрузки одометра	E_{oed}^{ref}	5000	120000	—	кН/м ²
Жесткости разгрузки/перегрузки	E_{ur}^{ref}	15000	36000	—	кН/м ²
Показатель степени для зависимости жесткости от уровня напряжений	m	0,5	0,5	—	—
Сцепление	c_{ref}	4	20	—	кН/м ²
Угол внутреннего трения	φ	17	21	—	°
Деформация сдвига, при которой $G_s = 0,722G_0$	$\gamma_{0.7}$	$0,376 \cdot 10^{-3}$	$0,248 \cdot 10^{-3}$	—	—
Модуль сдвига при очень малых деформациях	G_0^{ref}	$75,2 \cdot 10^3$	$136,3 \cdot 10^3$	—	кН/м ²
Коэффициент бокового давления грунта при консолидации	K_0^{nc}	0,708	0,642	—	—

В качестве основания принят массив грунта, состоящий из трех инженерно-геологических элементов (Иллюстрация 2):

- верхний слой — суглинки пылеватые серые, неясно-слоистые, с растительными остатками, текучие;
- средний слой — супеси пылеватые серые с гравием, галькой, с прослоями суглинка, пластичные;
- нижний слой — скальный грунт (гранит).

Физико-механические свойства грунтов представлены в Таблице 1. В рамках данного исследования изменение порового давления воды при сейсмических воздействиях не учитывалось.

Для верхнего и среднего слоев была принята модель материала с упрочнением при малых деформациях Hardening Soil with small strain stiffness (HSS) — модель, учитывающая жесткость грунта при малых деформациях, основана на упруго-пластической модели упрочняющегося грунта. Фактически для описания



Иллюстрация 1. Последствия землетрясения в г. Ниигата, Япония. 1964 г.



Иллюстрация 2. Массив грунта

изменения жесткости от величины деформации нужны только два дополнительных параметра:

- начальный модуль сдвига или модуль сдвига при сверхмалых деформациях G_0 ;
- уровень сдвиговой деформации $\gamma_{0.7}$, при котором секущий модуль

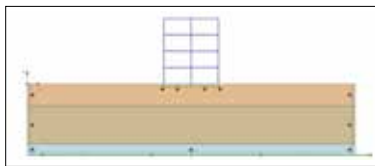


Иллюстрация 3. Расчетная модель со фундаментом на естественном основании

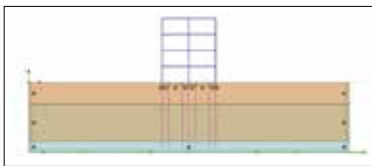


Иллюстрация 4. Расчетная модель со сваями-стойками

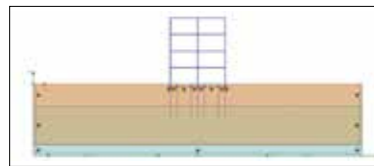


Иллюстрация 5. Расчетная модель с висячими сваями

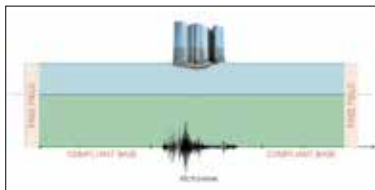


Иллюстрация 6. Граничные условия расчетной схемы

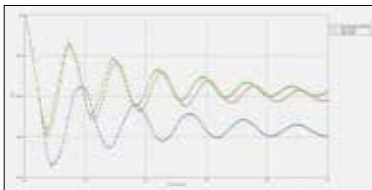


Иллюстрация 7. График перемещения верхней точки здания при собственных колебаниях

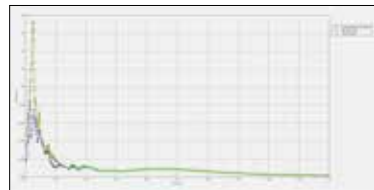


Иллюстрация 8. Спектр ответа в уровне фундамента сооружения

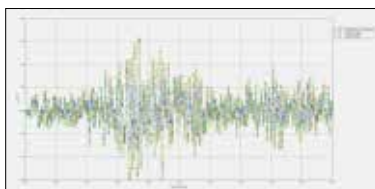


Иллюстрация 9. Акселерограмма в уровне фундамента сооружения

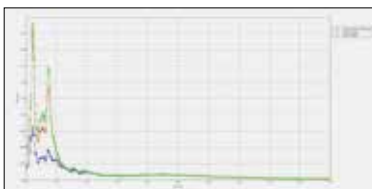


Иллюстрация 10. Спектр ответа в уровне верха сооружения

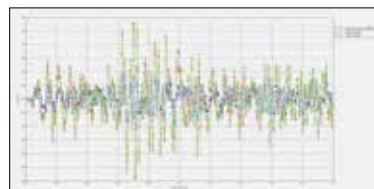


Иллюстрация 11. Акселерограмма в уровне верха сооружения

сдвига G_s уменьшается примерно до 70% от величины G_0 .

В зависимости от типа фундамента замоделированы три расчетные модели:

- фундамент на естественном основании (Иллюстрация 3);
- свайный фундамент — сваи-стойки сечением 400×400 мм (Иллюстрация 4);
- свайный фундамент — висячие сваи сечением 400×400 мм (Иллюстрация 5).

Выбор граничных условий зависит от местоположения источника колебаний:

- Источник расположен внутри схемы. Сгенерированные и отраженные волны выходят за границы схемы.
- Источник расположен вне схемы. Сгенерированные волны остаются внутри схемы, а отраженные должны выйти за ее пределы.

При расчете границы были назначены по второму пункту, когда источник землетрясения расположен вне схемы на большой глубине.

Граничные условия представлены на Иллюстрации 6. На нижней границе используется специальное граничное условие — Compliant base (податливое (совместимое) основание). Левая и правая границы задаются с помощью граничных условий Free field (свободное поле).

Результаты исследования

По результатам выполненных расчетов получены отклики расчетных динамических моделей во времени на заданное сейсмическое воздействие.

Из графика (Иллюстрация 7) видно, что периоды собственных колебаний зданий с фундаментами на естественном основании, со свайными фундаментами (висячие сваи, сваи-стойки) соответственно равны 0,9, 0,75, 0,725 с. Разница между максимальным и минимальным периодами составляет 19,4%. Отклик системы во времени представлен в виде спектров и акселерограмм (Иллюстрации 8–11).

Заключение

В ходе исследования выполнены расчеты во временной области с использованием записей ускорений, построены графики перемещений верха сооружения, спектры ответов в уровне фундамента и верха сооружения. При анализе отклика конструкций получены значительные расхождения в результатах для свайных фундаментов и фундамента на естественном основании: разница в периодах колебания составила 19,5%; пиковые ускорения отличаются более чем в 2 раза.

Полученные расхождения объясняются диссипативными свойствами

массива грунта, за счет которых снижается интенсивность сейсмического воздействия.

О чем говорят полученные результаты, как это влияет на проектирование?

Шкала интенсивности сейсмического воздействия дискретна и зависит от пиковых ускорений на поверхности грунта. На основании полученных пиковых ускорений рассматриваемая площадка строительства может быть отнесена к районам с разной интенсивностью, что, с одной стороны, ведет к занижению интенсивности сейсмического воздействия в случае фундаментов на естественном основании, а с другой стороны, к увеличению интенсивности в случае свайного основания.

К сожалению, авторами не были найдены подобные исследования о влиянии типа фундамента на отклик конструкции при землетрясении. Полученные результаты свидетельствуют об ошибочном подходе существующих нормативных документов в части назначения фоновой сейсмичности площадки строительства. В перспективе это может привести к катастрофическим последствиям при потенциальных землетрясениях.

Авторы считают, что тема влияния типов фундаментов на отклик при сейсмических воздействиях должна быть рассмотрена детально

сообществом инженеров и ученых с последующей корректировкой нормативной документации. На текущий момент авторский коллектив работает над разработкой системы уточнения фоновой сейсмичности площадки строительства при проведении микросейсмораирования и открыт к обсуждению данной проблемы.

Список использованной литературы

- [1] Кудашева М. И., Калошина С. В. Сравнение модели Мора — Кулона и модели упрочняющегося грунта в программном комплексе Plaxis // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. — 2017. — Т. 2. — С. 87–95. — EDN URN]XM.
- [2] Мацеля В. И., Сеелев И. Н., Леконцев А. В. Сравнительный анализ параметров конечно-элементных моделей грунтов, полученных численными методами // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. — 2017. — № 1 (63). — С. 23–31. — EDN YOQZYB.
- [3] Поляков С. В. Последствия сильных землетрясений. — М.: Стройиздат, 1978. — 311 с.
- [4] Сесар А. А. Ч. Анализ поведения здания на свайном фундаменте в слабых грунтах при землетрясении на основе численного моделирования с использованием программы Plaxis 2D // Вопросы устойчивого развития общества. — 2022. — № 4. — С. 1072–1099. — EDN OOSBQT.
- [5] Фадеев А. Б. Параметры модели упрочняющегося грунта программы «PLAXIS» // Численные методы расчетов в практической геотехнике: сб. ст. междунар. науч.-техн. конф. — СПб.: Изд-во СПбГАСУ, 2012. — С. 13–20.
- [6] Ari Ben-Menahem. A Concise History of Mainstream Seismology: Origins, Legacy, and Perspectives // Bulletin of the Seismological Society of America. — 1995. — Vol. 85. — No. 4. — P. 1202–1225. — DOI 10.1785/BSSA0850041202.
- [7] Brinkgreve R. B. J., Kappert M. H., Bonnier P. G. Hysteretic damping in small-strain stiffness model // Proc. 10th Int. Conf. on Comp. Methods and Advances in Geomechanics, Rhodes, Greece, 2007. — P. 737–742. — DOI 10.1201/NOE0415440271.ch106.
- [8] Brinkgreve R. B. J., Vermeer P. A. Plaxis: Finite Element Code for Soil and Rock Analyses: version 7: [user's guide]. — Balkema, 1998.
- [9] Brooms B. B. Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils // J. of Soil Mechanics and Foundations. — 1964. — Vol. 90, Iss. 2. — P. 123–156.
- [10] Housner G. W., McCann G. D. The Analysis of Strong Motion Earth-quake Records with Electric Analog Computer // Bulletin of the Seismological Society of America. — 1949. — Vol. 39. — № 1. — P. 47–56. — DOI 10.1785/BSSA0390010047.
- [11] Rønquist A., Remseth S., Lindholm C. Earthquake engineering design practice in Norway: Implementation of Eurocode 8 // Paper presented at the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, 2012. — P. 1–10. — URL: https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_2229.pdf (дата обращения: 27.02.2024).
- [12] Sluis J., Besseling F., Stuurwold P. Modelling of a pile row in a 2D plane strain FE-analysis / Numerical Methods in Geotechnical Engineering — Hicks, Brinkgreve & Rohe (Eds). — London: Taylor & Francis Group, 2014. — P. 277–282. — DOI 10.1201/b17017–51.
- [13] Ter-Martirosyan Z., Ter-Martirosyan A., Sidorov V. Settlement and Bearing Capacity of the Pile in A Three-Layer Base Taking into Account the Elastic-Visco-Plastic

Properties of Soils // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: XXVIII R-P-S Seminar 2019, Zilina, September 09–13, 2019. Vol. 661. — Zilina: Institute of Physics Publishing, 2019. — P. 012099. — DOI 10.1088/1757-899X/661/1/012099.

- [14] Ter-Martirosyan Z., Akuletskii A. Interaction of Long Piles with a Multilayer Soil Mass, Taking into Account the Elastic and Rheological Properties // Lecture Notes in Civil Engineering. — 2022. — Vol. 170. — P. 393–401. — DOI 10.1007/978-3-030-79983-0_37.
- [15] Zubritskiy M., Sabitov L., Ushakov O., Nabiullina K. Seismic resistance estimation of multi-story steel frames under ductility level earthquake impact by nonlinear static method // E3S Web of Conferences: 24, Moscow, April 22–24, 2021. — 2021. — Vol. 263. — P. 03011. — DOI 10.1051/e3sconf/202126303011.
- [16] Zubritskiy M. A., Sabitov L., Ushakov O. et al. Seismic resistance estimation of existing turbogenerator foundation structures under ductility level earthquake impact by nonlinear static method // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 7. VII International Scientific Conference «Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education», IPICSE 2020», 2021. — P. 012028. — DOI 10.1088/1757-899X/1030/1/012028.

References

- [1] Kudasheva M. I., Kaloshina S. V. Cravnenie modeli Mora — Kulona i modeli uprochnyayushchegosya grunta v programmnom komplekse Plaxis // Sovremennyye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika. — 2017. — T. 2. — S. 87–95. — EDN URN]XM.
- [2] Macelya V. I., Seelev I. N., Lekoncev A. V. Sravnitel'nyj analiz parametrov konechno-elementnykh modelей grunтов, poluchennykh chislennymi metodami // Vestn. Astrahan. gos. tekhn. un-ta. — 2017. — № 1 (63). — S. 23–31. — EDN YOQZYB.
- [3] Polyakov S. V. Posledstviya sil'nykh zemletryasenij. — M.: Strojizdat, 1978. — 311 s.
- [4] Sesar A. A. Ch. Analiz povedeniya zdaniya na svajnom fundamente v slabyyh gruntah pri zemletryasenii na osnove chislennogo modelirovaniya s ispol'zovaniem programmy Plaxis 2D // Voprosy ustojchivogo razvitiya obshchestva. — 2022. — № 4. — S. 1072–1099. — EDN OOSBQT.
- [5] Fadeev A. B. Parametry modeli uprochnyayushchegosya grunta programmy «PLAXIS» // CHislennyye metody raschetov v prakticheskoy geotekhnike: sb. st. mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. — Spb.: Izd-vo SPbGASU, 2012. — S. 13–20.
- [6] Ari Ben-Menahem. A Concise History of Mainstream Seismology: Origins, Legacy, and Perspectives // Bulletin of the Seismological Society of America. — 1995. — Vol. 85. — No. 4. — P. 1202–1225. — DOI 10.1785/BSSA0850041202.
- [7] Brinkgreve R. B. J., Kappert M. H., Bonnier P. G. Hysteretic damping in small-strain stiffness model // Proc. 10th Int. Conf. on Comp. Methods and Advances in Geomechanics, Rhodes, Greece, 2007. — P. 737–742. — DOI 10.1201/NOE0415440271.ch106.
- [8] Brinkgreve R. B. J., Vermeer P. A. Plaxis: Finite Element Code for Soil and Rock Analyses: version 7: [user's guide]. — Balkema, 1998.
- [9] Brooms B. B. Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils // J. of Soil Mechanics and Foundations. — 1964. — Vol. 90, Iss. 2. — P. 123–156.
- [10] Housner G. W., McCann G. D. The Analysis of Strong Motion Earth-quake Records with Electric

- Analog Computer // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1949. – Vol. 39. – № 1. – P. 47–56. – DOI 10.1785/BSSA0390010047.
- [11] Rønnquist A., Remseth S., Lindholm C. Earthquake engineering design practice in Norway: Implementation of Eurocode 8 // Paper presented at the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, 2012. – P. 1–10. – URL: https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_2229.pdf (data obrashcheniya: 27.02.2024).
- [12] Sluis J., Besseling F., Stuurwold P. Modelling of a pile row in a 2D plane strain FE-analysis / Numerical Methods in Geotechnical Engineering – Hicks, Brinkgreve & Rohe (Eds). – London: Taylor & Francis Group, 2014. – P. 277–282. – DOI 10.1201/b17017–51.
- [13] Ter-Martirosyan Z., Ter-Martirosyan A., Sidorov V. Settlement and Bearing Capacity of the Pile in A Three-Layer Base Taking into Account the Elastic-Visco-Plastic Properties of Soils // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: XXVIII R-P-S Seminar 2019, Zilina, September 09–13, 2019. Vol. 661. – Zilina: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012099. – DOI 10.1088/1757-899X/661/1/012099.
- [14] Ter-Martirosyan Z., Akuletskii A. Interaction of Long Piles with a Multilayer Soil Mass, Taking into Account the Elastic and Rheological Properties // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2022. – Vol. 170. – P. 393–401. – DOI 10.1007/978-3-030-79983-0_37.
- [15] Zubritskiy M., Sabitov L., Ushakov O., Nabiullina K. Seismic resistance estimation of multi-story steel frames under ductility level earthquake impact by nonlinear static method // E3S Web of Conferences: 24, Moscow, April 22–24, 2021. – 2021. – Vol. 263. – P. 03011. – DOI 10.1051/e3sconf/202126303011.
- [16] Zubritskiy M.A., Sabitov L., Ushakov O. et al. Seismic resistance estimation of existing turbogenerator foundation structures under ductility level earthquake impact by nonlinear static method // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 7. VII International Scientific Conference «Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education», IPICSE 2020», 2021. – P. 012028. – DOI 10.1088/1757-899X/1030/1/012028.

Статья поступила в редакцию

08.04.2024.

Опубликована 30.06.2024.

Zubritsky Maxim A.

Candidate of Technical Sciences, Ural State University of Architecture and Art (USUAA), Project Center, Chief Project Engineer, Yekaterinburg, Russian Federation

e-mail: zubrickiy_maksim@mail.ru

ORCID ID: 0000-0003-2066-8086

Ushakov Oleg Yu.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Institute of Civil Engineering and Architecture, Ural Federal University (UrFU), Yekaterinburg, Russian Federation

e-mail: ushakovoleg@yandex.ru

ORCID ID: 0000-0002-7514-3108

Sabitov Linar S.

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Institute of Design and Spatial Arts, Kazan Federal University (KFU), Kazan, Russian Federation

e-mail: l.sabitov@bk.ru

ORCID ID: 0000-0001-7381-9752

Alekhin Vladimir N.

Candidate of Technical Sciences, Head of a Department, Institute of Civil Engineering and Architecture, Ural Federal University (UrFU), Yekaterinburg, Russian Federation

e-mail: referetsf@yandex.ru