УДК 624.154.001.8
Мирсаяпов Илизар Талгатович
доктор технических наук, профессор
E-mail: mirsayapov1@mail.ru
Шакиров Марат Илдусович
ассистент
E-mail: jklnumb@mail.ru
Казанский государственный архитектурно-строительный университет
Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1
Сабирзянов Даниль Дамирович
директор
E-mail: danil198900@mail.ru
ООО «АртэксСтройПроект»
Адрес организации: 420097, Россия, г. Казань, ул. Лейтенанта Шмидта, д. 35а, оф. 312-313

Полевые испытания комбинированного плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении

Аннотация

Постановка задачи. Целью проведения полевых испытаний является исследование влияния многократно повторяющихся циклических нагружений на несущую способность и развитие осадки плитно-свайного фундамента, т.к. в основном экспериментальные исследования данного типа фундаментов проводились другими исследователями при кратковременных и ступенчатых статических нагружениях.

Результаты. В качестве результата исследований были получены данные о напряженно-деформированном состоянии массива грунта в межсвайном пространстве и под нижним концом свай, а также сведения об изменении усилий в сваях при циклическом нагружении.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что определение влияния циклического нагружения на поведение элементов плитно-свайных фундаментов, в дальнейшем, открывает возможность для создания метода расчета осадки и несущей способности, учитывающего влияние циклической нагрузки на плитно-свайные фундаменты.

Ключевые слова: плитно-свайный фундамент, циклические нагрузки, слабый грунт, полевые испытания, осадки основания, деформации, усилия, межсвайное пространство.

Ведение

В настоящее время увеличивающаяся плотность застройки городов создает тенденцию к увеличению этажности зданий и сооружений, а также приводит к активному освоению подземного пространства для наиболее эффективного использования, выделенных под застройку, городских участков. В связи с этим многократно увеличиваются нагрузки на фундамент и грунтовые основания под ними, при этом осваиваются строительные площадки, ранее непригодные для строительства. Поэтому в качестве одного из способов решения проблемы увеличения несущей способности и уменьшения деформаций грунтового основания в строительстве широко применяются комбинированные плитно-свайные фундаменты (КПСФ). При этом влияние циклическиого нагружения на данный тип фундаментов малоизучен, т.к. российскими и зарубежными исследователями [1-10] рассмотрены, в основном, вопросы влияния кратковременных статических нагружений.

Экспериментальные исследования

Полевые испытания для исследования напряженно-деформированного состояния элементов комбинированного плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении были проведены на испытательном полигоне кафедры «Основания,

фундаменты, динамика сооружений и инженерная геология» (ОФДСиИГ) Казанского государственного архитектурно-строительного университета (КГАСУ) (рис. 1).

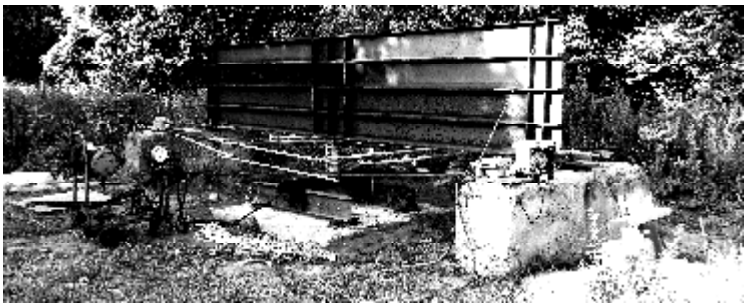

Рис. 1. Общий вид испытания плитно-свайного фундамента (иллюстрация авторов)

Перед устройством плитно-свайного фундамента сначала вырывался котлован размерами 3×3 м и глубиной 4 м, затем для определения деформаций и напряжений грунтового основания на определенных глубинах устанавливались грунтовые тензометрические датчики (рис. 2).

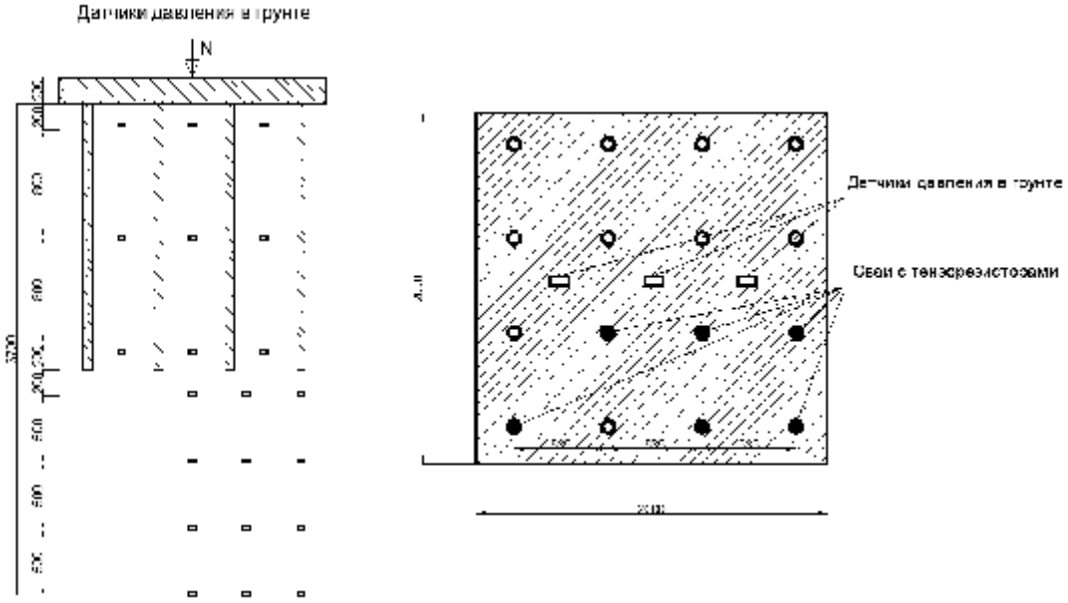

Рис. 2. Схема установки датчиков давления грунта и свай с тензорезисторами (иллюстрация авторов)

В качестве грунтового основания применялась супесь пластичная. Грунт уплотнялся равными порциями. Режим уплотнения для всех исследуемых образцов был единым. После уплотнения образец грунта до начала испытаний, в течение 1 месяца выдерживался под собственным весом. Для определения начальных физико-механических характеристик грунтового основания были пробурены скважины и отобраны пробы грунта методом режущих колец. У полученных значений отклонение от заданных величин находилось в пределах 0,2 % – по влажности и 0,2 кН/м^3 – по удельному весу, что подтверждает однородность распределения плотности и влажности приготовленного образца глинистого грунта w=12 %, ρ=1,65 г/см^3, E=12,8 МПа. Также были определены параметры прочности образца грунта: угол внутреннего трения – φ=20°, удельное сцепление частиц грунта – c=5 кПа.

Сваи плитно-свайного фундамента изготавливались следующим образом: сначала пробуривалась скважина длиной 2000 мм, диаметром 70 мм, далее производилась армирование сваи из арматурной стали класса А400 ø 10 мм. Для измерения усилий в

сваях на арматурные стержни были наклеены тензометрические датчики. После скважина заливалась мелкозернистым бетоном класса В15, W4. На протяжении всего испытания производились замеры вертикальных деформаций и усилий, возникающих в сваях. В качестве плиты была устроена монолитная железобетонная плита с размерами 2,0×2,0 м и высотой 0,2 м, выполненная из тяжелого бетона класса В15, каркас для армирования был выполнен из арматурной стали класса А400 ø 10 мм с шагом 150×150 мм. Схемы расположения датчиков давления в грунте и свай с, установленными на них, тензорезисторами показаны на рис. 2.

Осадка плитно-свайного фундамента также фиксировалась при помощи прогибомеров 6 ПАО с ценой деления 0,01 мм. Вертикальное нагружение плитно-свайного фундамента осуществлялось с помощью гидравлического домкрата. Испытания грунта при циклическом нагружении проводились по следующей методике (рис. 3): сначала плитно-свайному фундаменту ступенями прикладывалась вертикальная статическая нагрузка с интервалом 30 минут, затем, при достижении осадки s=30 мм, соответствующей вертикальному нагружению P_{max}=25 т, начиналась разгрузка плитно-свайного фундамента до P_{min}=12,5 т. Циклы выполнялись с чистотой 5×10^{-4} Гц (рис. 3).

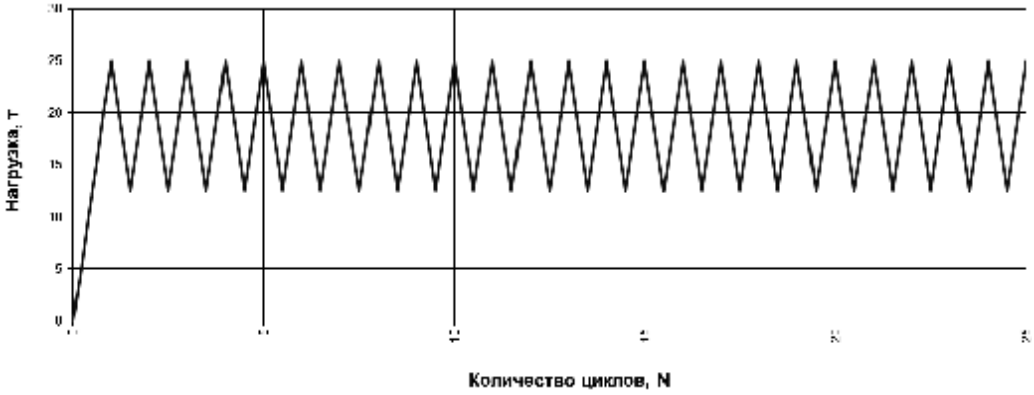

Рис. 3. Режим циклического нагружения при испытании плитно-свайного фундамента (иллюстрация авторов)

В качестве предельно допустимой осадки плитно-свайного фундамента было принято значение равное 80 мм.

Результаты полевых испытаний

Увеличение осадки основания, при действии циклических нагружений, наблюдалось на всем протяжении испытания. На приведенных графиках S от F и S от N (рис. 4 а, б), наблюдается интенсивное развитие осадок в течение первых 500 циклов циклических нагружений, после чего увеличение осадки существенно уменьшалось.

Анализ изменения осадки основания после различного количества циклов показывает, что увеличение осадки происходит, в основном, за счет увеличения их остаточной части при циклическом нагружении (рис. 4 а). При этом в течение одного цикла величина осадки меняется незначительно. Во время испытаний зафиксированы изменения этих («упругих») осадок по мере увеличения количества циклов нагружения. Эти осадки в течение первых 20 циклов несколько уменьшаются. Снижение величины «упругих» осадок можно объяснить уплотнением за счет уменьшения объема пор грунта, которое по скорости развития опережает уменьшения модуля сдвига деформаций сдвига между сваями и грунтом межсвайного пространства. Поскольку наибольшее уплотнение грунта происходит в начальный период повторных нагружений, а изменение сцепления между грунтом и сваями является более длительным процессом, «упругие» осадки оснований начинают увеличиваться уже после первых 50 циклов нагружений. В случае, если не достигается предельное состояние основания, к моменту 1000 циклов нагружения наступает относительная стабилизация, т.е. зависимость F-$S_{уп}$ становится близкой к линейной (рис. 4а).

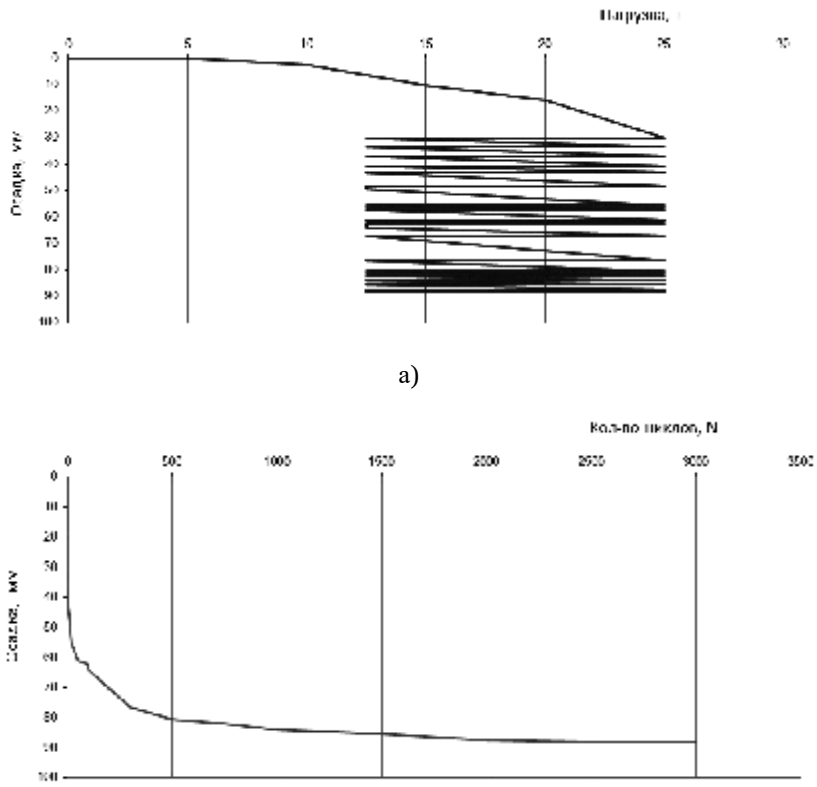

Рис. 4. Графики развития осадки фундамента: а) осадка от нагрузки при циклическом нагружении; б) осадка от количества циклов нагружения (иллюстрация авторов)

Как видно из графика S от N (рис. 4 б) происходит переход криволинейной диаграммы в прямолинейную, что свидетельствует о переходе деформирования грунта в линейную стадию.

При этом осадки основания изменяются в процессе циклических нагружений аналогично деформациям грунта межсвайного пространства. В то же время увеличение осадок основания составляет до 30 % по сравнению с первым циклом нагружения.

На рис. 5 показаны изменения усилий в сваях. По мере увеличения количества циклов увеличиваются усилия в сваях в связи с тем, что происходит перераспределения деформаций и напряжений из грунта межсвайного пространства в сваи. Необходимо отметить, что наибольшие усилия возникают в рядовых и угловых сваях, а наименьше в центральных. Объясняется это тем, что в средней зоне условного фундамента, центральные сваи обжимает наиболее уплотненный грунт, а угловые и рядовые сваи взаимодействуют с участками менее уплотненного грунта за пределами плиты ростверка.

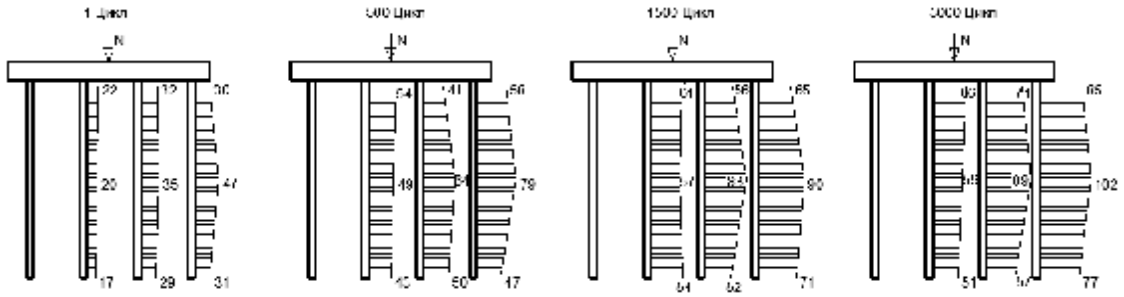

Рис. 5. Эпюры усилий в сваях после различного количества циклов, H (P_{min}=12,5 т, P_{max}=25 т) (иллюстрация авторов)

При циклическом нагружении плитно-свайного фундамента деформации в грунте межсвайного пространства уменьшаются во всем протяжении испытания (рис. 6). Таким образом, существенное уменьшение общих деформаций наблюдается под плитной частью плитно-свайного фундамента (до 2-х раз).

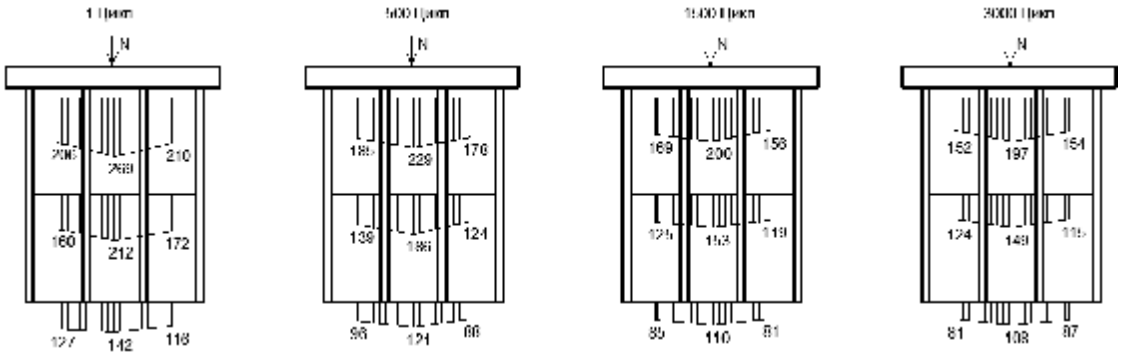

Рис. 6. Эпюры деформаций грунта межсвайного пространства при различных количествах циклов, кПа (P_{min}=12,5 т, P_{max}=25 т) (иллюстрация авторов)

Это объясняется тем, что рост общей деформации грунтового основания ограничивается сваями, в свою очередь, деформирование свай сдерживается грунтовым основанием уплотненным в процессе циклического нагружения свайно-плитного фундамента.

Заключение

По результатам полевых испытаний можно сделать следующие выводы:

1. Анализ изменения осадок оснований после различного количества циклов показывает, что, в основном, увеличение осадки происходит за счет увеличения их необратимой части и составляет до 30 % от первоначальной.

2. Максимальная величина циклической нагрузки, воспринимаемая плитно-свайным фундаментом, зависит от условий совместного деформирования грунта, свай и плитного ростверка, а также их прочностных и деформационных свойств.

3. При приложении нагрузки на плиту ростверка на некотором этапе под подошвой плиты ростверка начинает происходить образование зоны уплотненного грунта (ядра). Циклическое нагружение приводит к увеличению размеров уплотненного ядра и плотности грунта в этой зоне.

4. Проведенное полевое испытание показывает, что при циклическом нагружении происходит уплотнение грунта межсвайного пространства до 20 %, которое приводит к увеличению несущей способности свай по боковой поверхности.

5. Явлением образования уплотненных зон объясняется то, что крайние ряды свай, а также сваи, расположенные в углах ростверка, являются значительно перегруженными, в отличие от центральных свай, в связи с тем, что они не попадают в уплотненную зону.

6. Полученные результаты показывают, что образование уплотненного ядра приводит к увеличению несущей способности сваи в центральной зоне до 20 %.

7. Проведенные экспериментальные исследования показали, что при циклическом нагружении происходит уменьшение деформаций в грунте межсвайного пространства с ростом количества циклов нагружения, но при этом увеличиваются деформации и усилия в сваях. Таким образом, усилия в сваях, в зависимости от места расположения в плане и уровня циклической нагрузки, увеличиваются до 60 %.

Список библиографических ссылок

1. Мирсаяпов И. Т., Шакиров М. И. Плитно-свайные фундаменты при циклическом нагружении : сб. ст. Геотехника Беларуси: Наука и практика – Международной научно-технической конференции / БНТУ. Минск, 2013. С. 314–320.

2. Katzenbach R. Soil-structure-interaction of Tunnels and Superstructures During Construction and Service Time // Procedia Engineering. 2013. Vol. 57. P. 35–44.
3. Мирсаяпов И. Т., Шакиров М. И. Экспериментальные исследования несущей способности и осадок оснований плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении : сб. ст. Перспективные направления развитии теории и практики в реологии и в механике грунтов – XIV Международного симпозиума по реологии / КГАСУ. Казань, 2014. С. 68–74.
4. Мирсаяпов И. Т., Шакиров М. И. Несущая способность и осадки моделей плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении : сб. ст. Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании – Международной научной конференции / МГСУ. Москва, 2012. С. 528–531.
5. Мирсаяпов И. Т., Шакиров М. И. Исследование влияния циклической нагрузки на модели комбинированного плитно-свайного фундамента : сб. ст. Строительство – формирование среды жизнедеятельности – XVII Международной научной конференции / МГСУ. Москва, 2014. С. 423–429.
6. Мирсаяпов И. Т., Королева И. В. Прочность и деформируемость глинистых грунтов при режимном пространственном напряженном состоянии с учетом трещинообразования // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2016. № 1. С. 16–23.
7. Шакиров И. Ф., Гайфуллина В. А. Исследование влияния добавок на инъекционные свойства цементных растворов, применяемых при укреплении грунтов напорной цементацией : сб. ст. Технические науки – от теории к практике – XXI Международной научно-практической конференции / СПбГАСУ. Санкт-Петербург, 2017. С. 37–41.
8. Mirsayapov I. T., Shakirov M. I. Bearing capacity and settlement of raft-pile foundations under cyclic loading : dig. of art. 1st International conference on energy geotechnics / ICEGT. Kiel. Germany, 2016. P. 423–428.
9. Mirsayapov I. T., Shakirov M. I. Behaviour of pile–plate foundations under cyclic loading : dig. of art. Baltic Piling Days – Proceedings of the baltic piling days conference / Estonian Geotechnical Society ISSMGE. Tallin, 2012. P. 31–34.
10. Mirsayapov I. T., Sabirzyanov D. D. Bearing capacity of foundations base under combined alternating long-term static and cyclic loading : dig. of art. Materials Science and Engineering 365 / IOP Conferense Series, 2018. P. 1–10.

Mirsayapov Ilizar Talgatovich
doctor of technical sciences, professor
E-mail: mirsayapov1@mail.ru
Shakirov Marat Ildusovich
assistant
E-mail: jklnumb@mail.ru
Kazan State University of Architecture and Engineering
The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1
Sabirzyanov Danil Damirovich
director
E-mail: danil198900@mail.ru
LLC «ArteksStroyProekt»
The organization address: 420097, Russia, Kazan, Lieutenant Schmidt st., 35a, of. 312-313

Field researches of the combined plate-pile foundation under cyclic loading

Abstract

Problem statement. The purpose of the field tests is to study the effect from multiple repetitive cyclic loads on the bearing capacity and the settlement development of the plate-pile foundation. Experimental studies of this type foundations were mainly carried out under short-term and stepped static loads.

Results. As a result of the research, data were obtained on the stress-strain state of the soil mass in the between pile area and under the lower end of the piles, as well as information on the change in the forces in the piles under cyclic loading.

Conclusions. The obtained results significance for the construction industry is that determining the effect of cyclic loading on the behavior of plate-pile foundations elements in the future opens up the possibility for creating a method for calculating the settlement and bearing capacity that takes into account the influence of cyclic load on plate-pile foundations.

Keywords: plate-pile foundation, cyclic loads, weak soil, field researches, groundbase settlement, deformations, efforts, between pile area.

References

1. Mirsayapov I. T., Shakirov M. I. Plate-pile foundations under cyclic loading : dig. of art. Geotechnics Belarus: Science and Practice – International scientific-technical conference / BNTU. Minsk, 2013. P. 314–320.
2. Katzenbach R. Soil-structure-interaction of Tunnels and Superstructures During Construction and Service Time // Procedia Engineering. 2013. Vol. 57. P. 35–44.
3. Mirsayapov I. T., Shakirov M. I. Experimental study of bearing capacity and the settlement of bases raft-pile foundations under cyclic loading : dig. of art. Perspective development directions of the theory and practice in rheology and soil mechanics – Proceedings of the XIV International rheology Symposium / KGASU. Kazan, 2014. P. 68–74.
4. Mirsayapov I. T., Shakirov M. I. Bearing capacity and settlement patterns raft-pile foundations under cyclic loading : dig. of art. Integration, partnership and innovation in building science and education – International scientific conference / MGSU. Moscow, 2012. P. 528–531.
5. Mirsayapov I. T., Shakirov M. I. Research of the cyclic loading effect on model combined raft-pile foundation construction : dig. of art. Forming environment of life – XVII International scientific conference / MGSU. Moscow, 2014. P. 423–429.
6. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. The strength and deformability of clay soils under the regime spatial stress state in view of cracking // Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov. 2016. № 1. P. 16–23.
7. Shakirov I. F., Gayfullina V. A. Researches of the effect from additives on the cement mortars injection properties used in strengthening soil pressure cementation : dig. of art. Technical sciences – from theory to practice – XXI international scientific-practical conference / SPbGASU. Saint Petersburg, 2017. P. 37–41.
8. Mirsayapov I. T., Shakirov M. I. Bearing capacity and settlement of raft-pile foundations under cyclic loading : dig. of art. 1st International conference on energy geotechnics / ICEGT. Kiel. Germany, 2016. P. 423–428.
9. Mirsayapov I. T., Shakirov M. I. Behaviour of pile–plate foundations under cyclic loading : dig. of art. Baltic Piling Days – Proceedings of the baltic piling days conference / Estonian Geotechnical Society ISSMGE. Tallin, 2012. P. 31–34.
10. Mirsayapov I. T., Sabirzyanov D. D. Bearing capacity of foundations base under combined alternating long-term static and cyclic loading : dig. of art. Materials Science and Engineering 365 / IOP Conferense Series, 2018. P. 1–10.