



УДК 624.159.4

**Мирсаяпов Илизар Талгатович**

доктор технических наук, профессор

E-mail: [mirsayapov1@mail.ru](mailto:mirsayapov1@mail.ru)

**Шараф Хани Мохаммед Абдо**

аспирант

E-mail: [hani\\_2012@mail.ru](mailto:hani_2012@mail.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

### **Экспериментальные исследования несущей способности и осадки оснований фундаментов на глинистых грунтах при режимных блочных циклических нагружениях**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Проведены экспериментальные исследования несущей способности и осадки оснований фундаментов из глинистых грунтов при блочных режимных циклических нагружениях. Проведение лотковых испытаний с помощью гидравлической системы (АСИС) позволило определить осадки основания, напряжения и деформации в грунте.

*Результаты.* Результаты экспериментальных исследований представлены в виде графиков зависимости осадки и деформации от режима нагружения. Получены новые данные о закономерностях напряженно-деформированного состояния глинистых грунтов при блочных циклических нагружениях.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что при режимных блочных циклических нагружениях происходит увеличение деформации грунтов в пределах сжимаемой толщи, а также происходит осадка основания с различной интенсивностью во всех блоках нагружений. Наиболее интенсивное развитие деформаций грунта и осадки основания происходило на начальной стадии нагружения до 300 циклов, при переходе на вторую стадию, происходила стабилизация до 2700 циклов. Потеря несущей способности происходит на третьей стадии нагружения, после достижения предельного состояния массива грунта в сжимаемой толще плитного фундамента.

**Ключевые слова:** блочное циклическое нагружение, глинистый грунт, осадка, напряжение, деформация.

#### **Введение**

В современных условиях грунтовые основания зданий и сооружений подвергаются воздействию статических и, различного рода режимных, циклических нагружений. Существующие методы расчета оснований по несущей способности и деформациям, в основном, разработаны для случая однократного кратковременного статического нагружения или циклического нагружения с постоянными параметрами на весь период эксплуатации [1-3]. Эксплуатации зданий и сооружений с оборудованием, создающим циклические воздействия, и режимы нагружения оснований фундаментов в реальных условиях являются не постоянными, меняются на различных этапах технического процесса. Результаты немногочисленных имеющихся экспериментальных исследований показывают, что закономерности развития деформаций и изменения прочности грунтов при режимных циклических нагружениях отличаются от поведения грунтов при стационарных циклических нагружениях [4-6]. По этой причине возникает необходимость в разработке методов расчетов несущей способности и деформации оснований фундаментов при режимных циклических нагружениях. В связи с этим проведены экспериментальные исследования несущей способности и осадок грунтовых оснований модели фундаментов в объемном лотке при режимных циклических нагружениях [7-10].

#### **Экспериментальные исследования**

Экспериментальные исследования проводились в объемном металлическом лотке с

размерами 1000×1000×1000 мм (рис. 1) и представляют собой два слоя грунта с различными физико-механическими характеристиками.

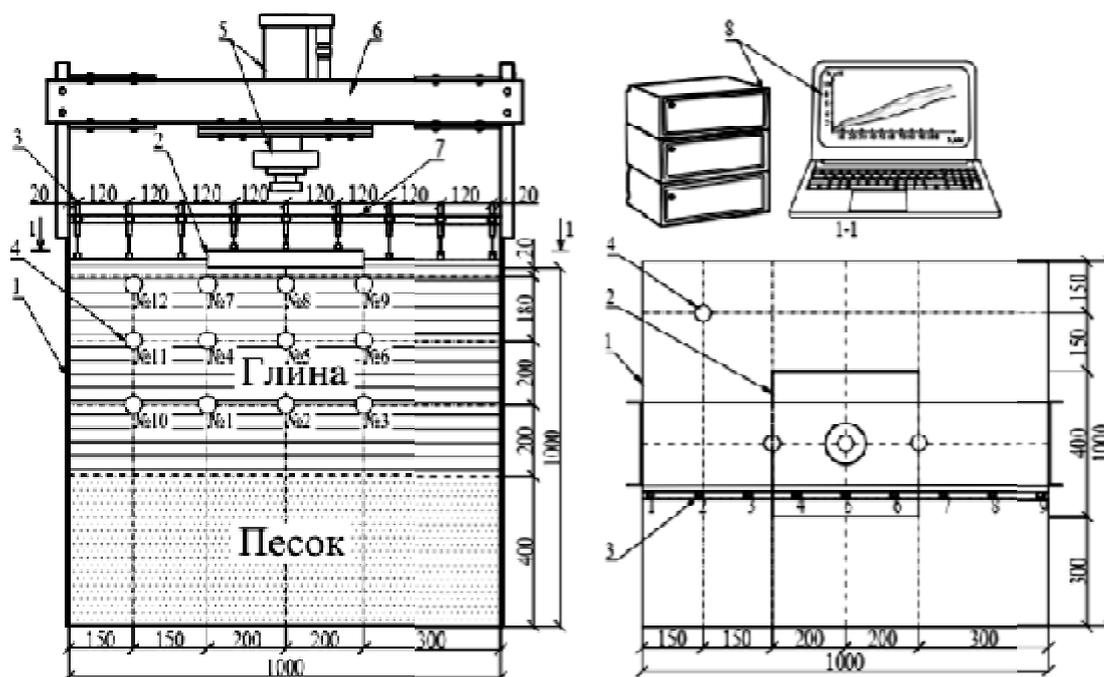


Рис. 1. Схема конструкций и расположений приборов:

- 1 – объёмный лоток; 2 – модель плитного фундамента; 3 – вертикальные электронные датчики;
- 4 – грунтовые датчики; 5 – автоматический домкрат; 6 – установка домкрата;
- 7 – балка для установки вертикальных датчиков;
- 8 – автоматизированная система программы (АСИС) (иллюстрация авторов)

Двухслойные грунтовые основания во всех экспериментальных исследованиях состояли из следующих грунтов:

– полутвердая глина с мощностью  $h=600$  мм; плотность  $\rho=1,8$  г/см<sup>3</sup>; влажность  $W=26$  %; угол внутреннего трения  $\varphi=25$  град; удельное сцепление  $C=30,4$  кПа; начальный модуль деформации  $E=3,2$  МПа.

– мелкий маловлажный песок с мощностью  $h=400$  мм; плотность  $\rho=1,93$  г/см<sup>3</sup>; влажность  $W=5$  %; угол внутреннего трения  $\varphi=39$  град; удельное сцепление  $C=63,1$  кПа; модуль деформации  $E=7,2$  МПа.

Таблица

Экспериментальная модель	№ блоков нагружения	$R_{max}$ , кН	$R_{min}$ , кН	Количество циклов в этапах нагружения	Количество циклов в блоках нагружения	Общее количество циклов нагружения
ПФ	№ 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15	7	3,5	100	300·8=2400	3450
		9	4,5	100		
		11	5,5	100		
	№ 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14	7	3,5	50	150·7=1050	
		9	4,5	50		
		11	5,5	50		

Сначала в объёмный лоток укладывается песок до отметки 400 мм и уплотняется

трамбовкой до заданного значения плотности. Затем укладывается слоями глина по 5 см до отметки 1000 мм без уплотнения. После укладывания двухслойного грунтового основания, в центре лотка устанавливается модель плитного фундамента – штамп в виде железобетонной плиты с размерами 400×400 мм длиной, шириной и толщиной 40 мм. Нагружение осуществляется гидравлической автоматизированной системой (АСИС), блоками в зависимости от заданного режима нагружения. На каждом блоке нагружения фиксируются значения осадок основания по показателям электронных датчиков, а также напряжения и деформации в грунте основания. Параметры режима блочного циклического нагружения приведены в таблице. Расположение датчиков показано на (рис. 1). По показаниям датчиков определяются относительные деформации и напряжения в грунте основания, а также в процессе измеряется осадка модели плитного фундамента.

**Результаты экспериментальных испытаний**

По результатам экспериментальных исследований построены графики изменения напряженно-деформированного состояния грунта в процессе режимоного блочного циклического нагружения.

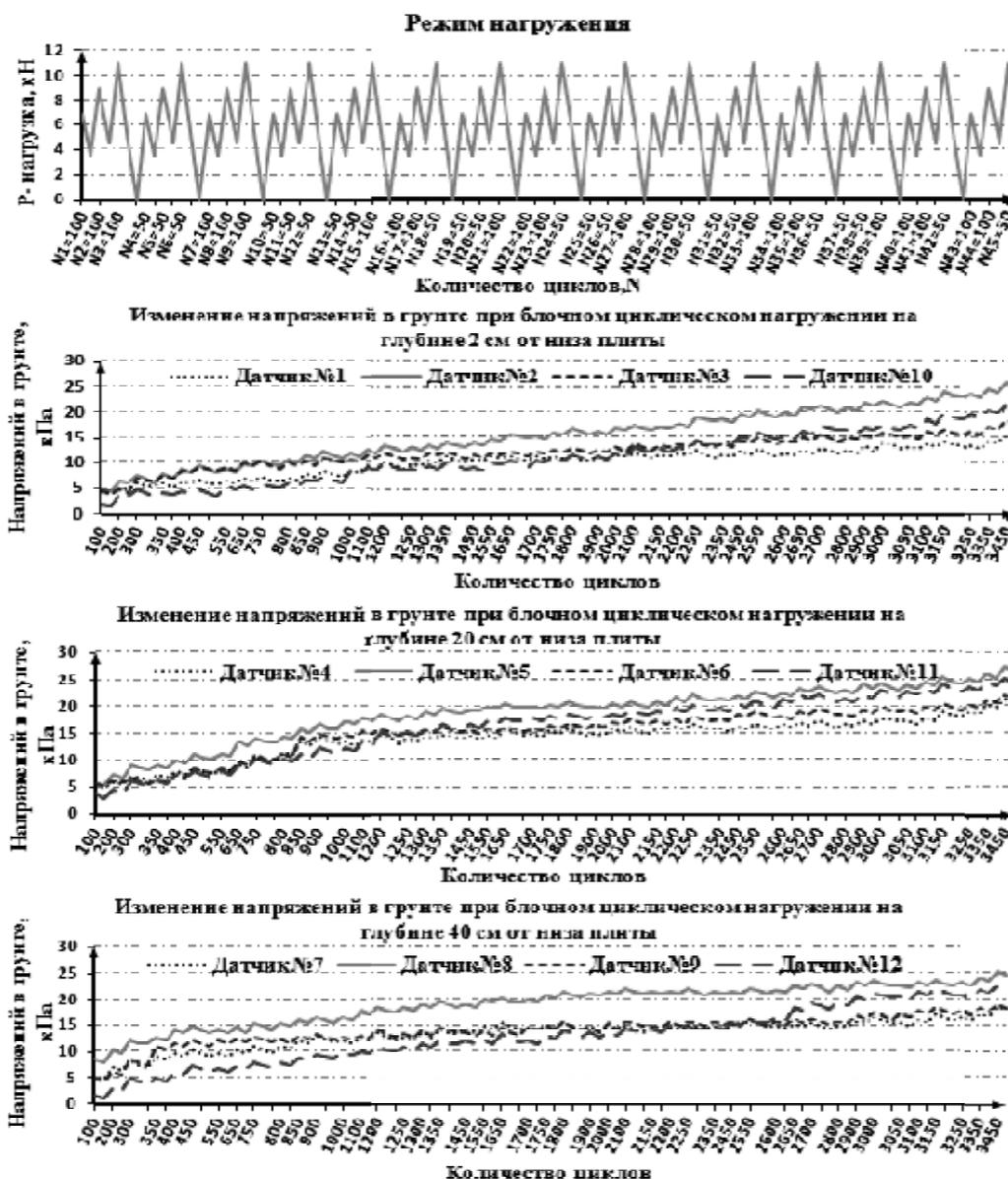


Рис. 2. Изменение напряжений в грунте в зависимости от режима нагружения (иллюстрация авторов)

На (рис. 2). Показаны графики изменения напряжений в различных зонах и глубинах грунтового основания. По графикам видно, что, при увеличении количества циклов на каждом блоке, происходит увеличение напряжения в грунте во всех зонах и глубинах грунтового основания нагружения. При этом наибольшее увеличение напряжений в грунте показывают датчики № 2, № 5 и № 8, которые расположены в центре под плитным фундаментом на глубине 2, 20 и 40 см, при этом напряжения достигали от 25 до 27 кПа. Меньшее увеличение напряжений в грунте показывают датчики № 1, № 4 и № 7, которые расположены с левого края плиты на глубине 2, 20 и 40 см, при этом напряжения достигли от 15 до 19 кПа. Блочные циклические нагружения вызывают увеличения деформации и осадки основания в пределах модели плитного фундамента и за его пределами.

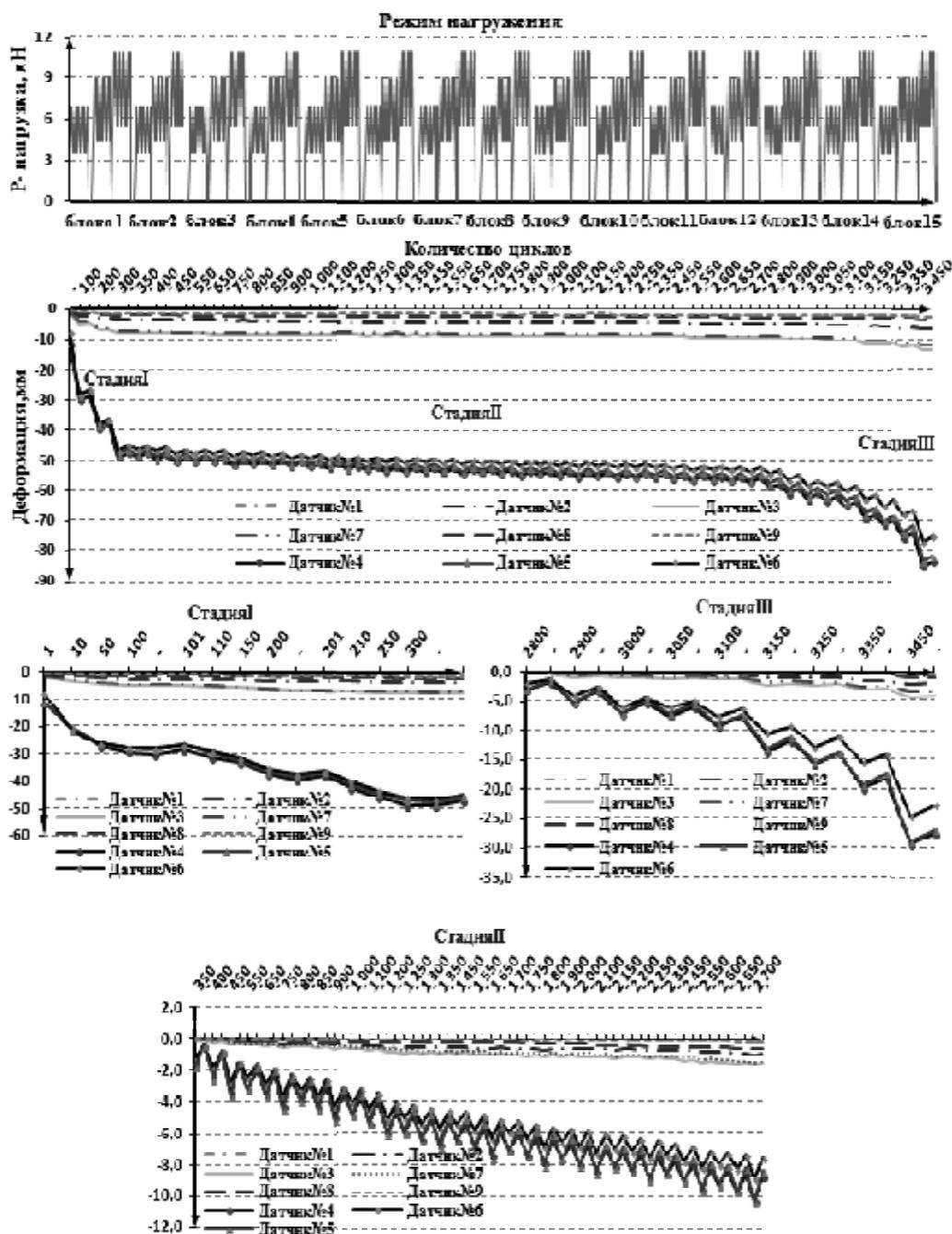


Рис. 3. Изменение вертикальных деформаций под моделью плитного фундамента и за его пределами в зависимости от режима нагружения (иллюстрация авторов)

График изменения деформаций глинистых грунтов при блочных циклических нагрузениях, под моделью плитного фундамента и за его пределами, в пределах каждого блока нагружения показан на (рис. 3). По графикам видно, что режим нагружения приводит к увеличению относительных деформаций. При этом значительные вертикальные деформации происходят на первой стадии нагружения до 300 циклов. Наибольшие деформации показывают датчики № 4-7, которые расположены под моделью плитного фундамента и составляют 44,77-47,17 мм. При переходе ко второй стадии происходит стабилизация деформации, и интенсивность развития деформации уменьшается. В пределах второй стадии прирост деформации за 2700 циклов составляет 8,83-10,39 мм. На третьей стадии происходит более интенсивное увеличение деформации, и прирост составляет 2,5 раза по сравнению со второй стадией до разрушения.

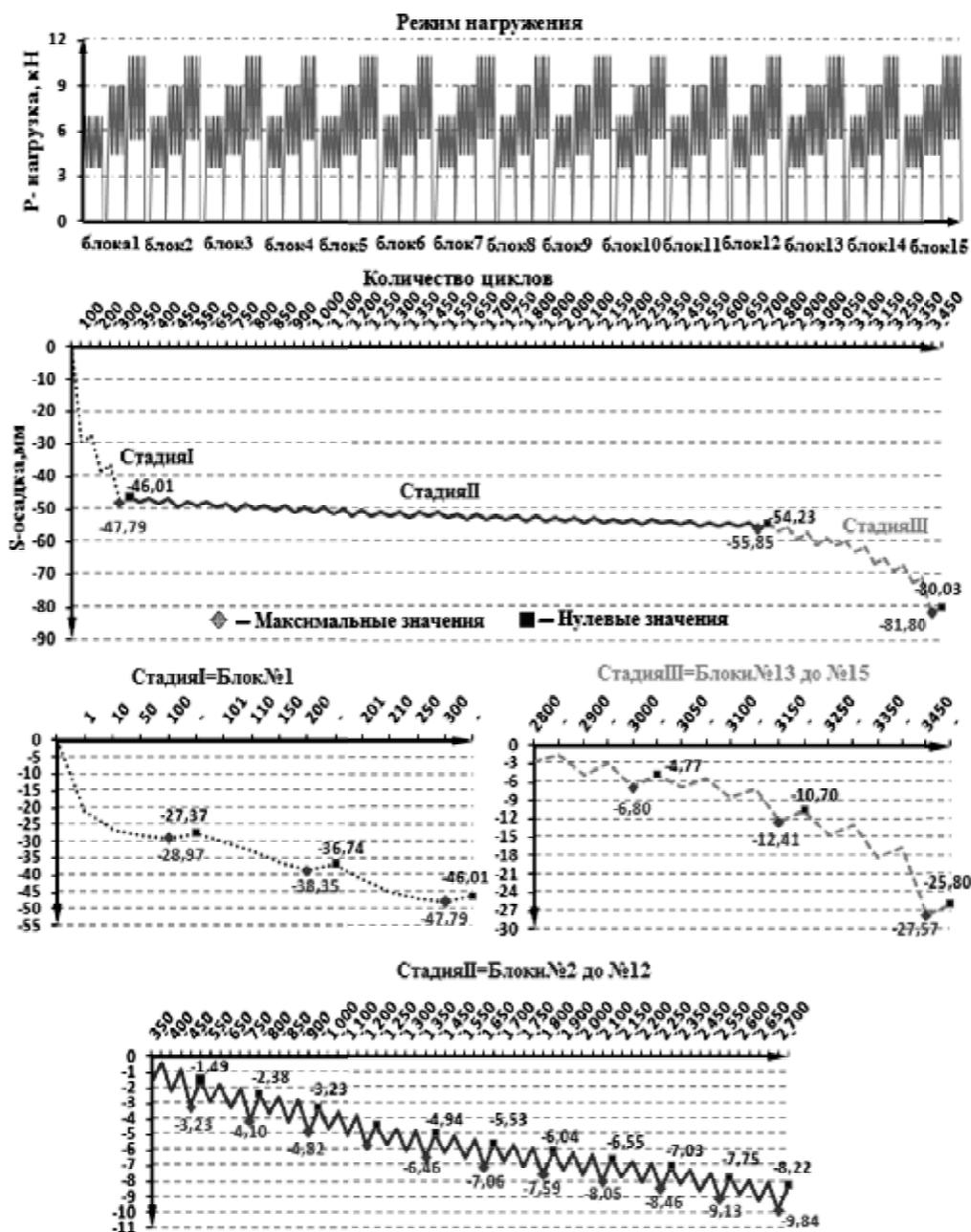


Рис. 4. Развитие осадок плитного фундамента при блочных циклических нагружениях (иллюстрация авторов)

На (рис. 4). Показано развитие осадок плитного фундамента на каждой стадии нагружения. По графикам видно, что происходит интенсивное развитие осадок на первой стадии режима нагружения до 300 циклов, при этом осадка равна 47,79 мм и составила 58 % от общей осадки. Интенсивность развития осадок уменьшается при переходе ко второй стадии до 2700 циклов, но полной стабилизации осадок не происходит, при этом осадка равна 55,85 мм и составила 12 % от общей осадки. При дальнейшем нагружении начинается третья стадия до 3450 циклов, развитие осадок интенсивно увеличивается до потери несущей способности грунтового основания. При этом осадка равна 81,80 мм и составила 33 % от общей осадки. Необходимо отметить, что при разгрузке до нуля, осадка уменьшается в пределах 1-2 мм на всех блоках нагружения.

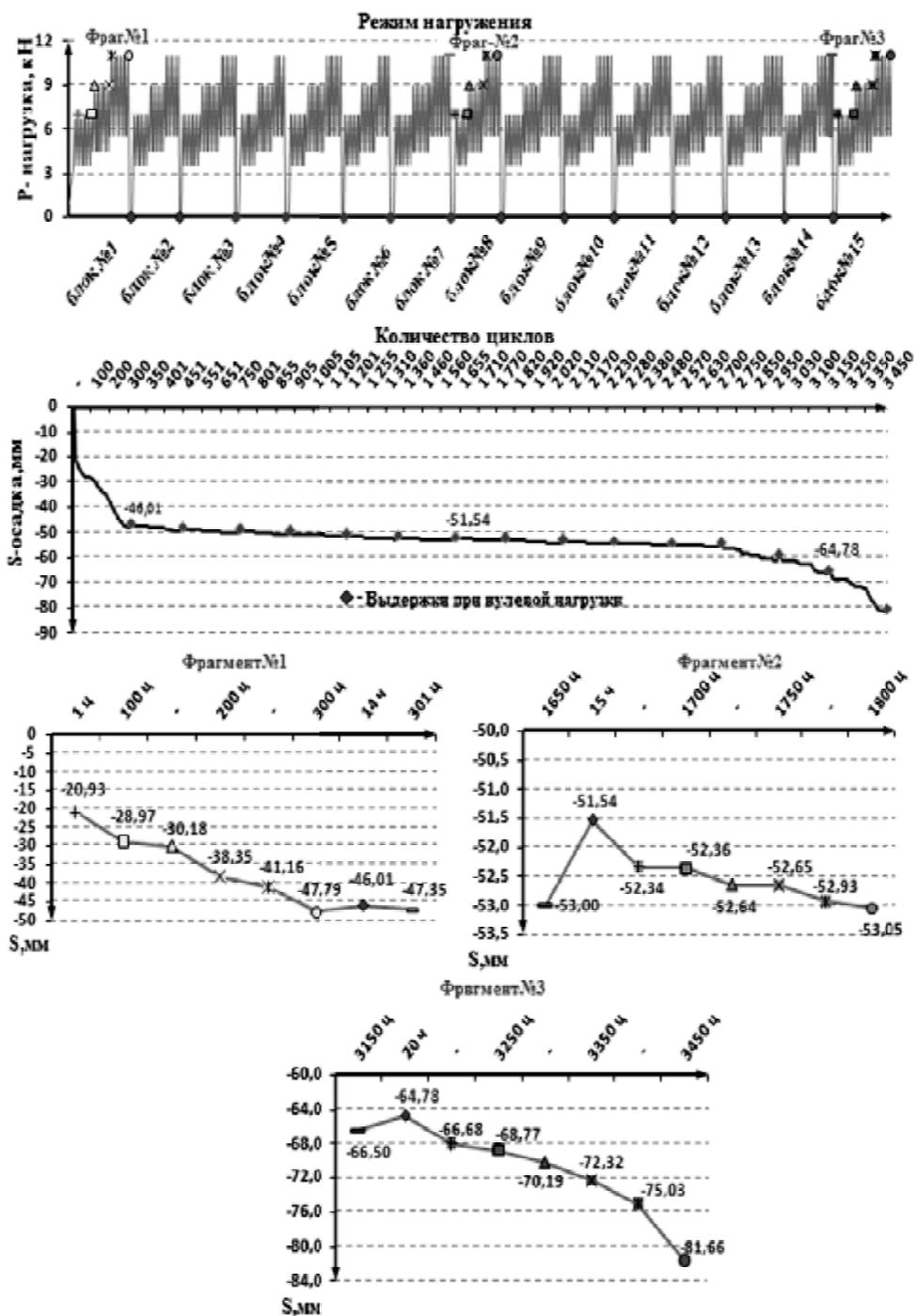


Рис. 5. Изменение осадки плитного фундамента в определенных точках в зависимости от режима нагружения (иллюстрация авторов)

На (рис. 5). Приведены графики изменения осадки в определённых точках нагружений. Как видно из графиков, при увеличении вертикальных нагрузок от 7-9 кН и 9-11 кН происходит увеличение осадок на 1,21-2,18 мм на блоке № 1; 0,28 мм – на блоке № 8 и 1,42-2,71 мм – на блоке № 15. Затем, при переходе на этапы разгрузки (этапы выдержки), происходит уменьшение осадок в пределах 1-2 мм в течение 14-30 часов. А когда опять увеличивается нагрузка с нуля до 7 кН, осадка увеличивается на 1,34 мм на блоке № 2; 0,8 мм – на блоке № 8 и 2 мм – на блоке № 15.

Анализируя результаты экспериментальных исследований глинистого грунта в объёмных лотках при режимном циклическом нагружении, можно сделать вывод о том, что происходит изменение всех деформационных и прочностных параметров глинистого грунта. Как видно из графиков (рис. 3-5), наблюдается увеличение вертикальных деформаций, и осадок основания модели плитного фундамента во всех блоках восходящего режима нагружения при действии циклических нагрузок, в пределах каждого блока происходило увеличение вертикальных деформаций и осадок. Деформации с различной интенсивностью развивались на всем протяжении испытаний. Наиболее интенсивное развитие деформаций происходило в начальной стадии каждого блока нагружения. Затем наступала относительная стабилизация, но полной стабилизации деформаций не наблюдалась при переходах на блоки с большим уровнем напряжений. В начальный период не наблюдается резких скачков деформаций, это связано с процессами самоупрочнения и самозалечивания грунта и перераспределением усилий между характерными зонами основания по площади и глубине. Затем, после 100-200 циклов нагружения, начинается приращение деформаций и осадок грунтового основания. При переходах на другие блоки наблюдается аналогичный характер развития деформации. При переходах на блоки с меньшим уровнем нагрузки в момент изменения режима нагружения происходит незначительное уменьшение полных деформаций за счет упругой составляющей или деформации стабилизируются. Затем, по мере увеличения времени приложения циклической нагрузки, происходит дальнейшее приращение деформаций. Характер развития деформаций в блоках с меньшим уровнем напряжений зависит от продолжительности действия циклической нагрузки в блоках с высокими напряжениями и продолжительности рассматриваемого блока нагружения (рис. 3-5). Природа этого явления объясняется эффектом задержки развития микро- и макротрещин и эффектом самоупрочнения и самозалечивания глинистого грунта за счет восстановления структурных и коагуляционных связей после перехода на блок с меньшим уровнем нагрузки. Необходимо отметить, что накопление общих деформаций происходит, в основном, за счет пластичной составляющей. Упругие деформации в пределах каждого блока циклического нагружения меняются незначительно (рис. 3-5).

### **Заключение**

Основываясь на результате экспериментального исследования, можно сделать следующие выводы:

- При режимном блочном циклическом нагружении происходит изменение напряжений в грунте на всем протяжении испытаний. Наибольшее изменение происходит в центре под плитным фундаментом на глубине 20 см.

- Развитие деформации и осадки плитного фундамента при блочном циклическом нагружении происходит на трех стадиях нагружения. На первой стадии – стадия уплотнения грунта до 300 циклов – происходит интенсивное развитие осадок, и при этом осадка составляет 58 % от общей осадки. На второй стадии – стадия стабилизации грунта до 2700 циклов – интенсивность развития осадок уменьшается, но полной стабилизации осадок не происходит и при этом осадка составляет 12 % от общей осадки. На третьей стадии – стадия разрушения грунта до 3450 циклов – развитие осадок интенсивно увеличивается до потери несущей способности грунтового основания. При этом осадка составляет 30 % от общей осадки.

- После полной разгрузки (до нуля) каждого блока нагружения наблюдается за изменениями осадок от 12-ти часов до одних суток, при этом происходит уменьшение осадки плитного фундамента в пределах 1-2 % от общей осадки.

**Список библиографических ссылок**

1. Andersen K. H. Bearing capacity under cyclic loading offshore, along the coast and on land // NRC Research press. 2007. P. 513–535.
2. Adrian F. L., Yasuhara K., Hirao K. Stability criteria for marine clay under one way cyclic loading. Geotech Engng. 1993. P. 1771–1789.
3. Yasuhara K., Murakami S., Noritaka T., Adrian F. L. Settlements in fine-grained soils under cyclic loading // Soils and foundations. Japanese geotechnical society. 2001. P. 25–36.
4. Jia J. Dynamic and cyclic properties of soils // Soil dynamics and foundation modeling // Springer international publishing Ag. 2018. P. 75–108.
5. Braja M. D., Eun C. S. Cyclic load-induced settlement of foundations on clay : Fourth International conference on case histories in Geotech. Engng. 1998. P. 224–226.
6. Гольдштейн М. Н. Механические свойства грунтов: Напряженно-деформативные прочностные характеристики. М. : Стройиздат. 1979. 304 с.
7. Денисенко В. В., Ляшенко П. А. Упрочнение и разупрочнение глинистого грунта // Научный журнал КубГАУ. 2016. № 120. С. 61–67.
8. Седин В. Л., Винников Ю. Л., Биксу К. М. О. Влияния повторных нагружений набивных свай в пробитых скважинах на деформативность их оснований // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2014. № 3. С. 112–120.
9. Шакиров И. Ф., Гарифуллин Д. Р. Исследование массива грунта, укрепленного напорной цементацией : сб. ст. VIII междунар. научно-практич. Конференции. Актуальные вопросы науки, технологии и производства // СПбГАСУ. Санкт-Петербург. 2015. С. 80–83.
10. Ляшенко П. А., Гохаев Д. В., Шмидт О. А. Оценка изменения деформационных характеристик глинистых грунтов в основании буронабивных свай при повторном нагружении // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2016. № 4. С. 123–132.

**Mirsayapov Iizar Talgatovich**

doctor of technical sciences, professor

E-mail: [mirsayapov1@mail.ru](mailto:mirsayapov1@mail.ru)**Sharaf Hani Mohammed Abdo**

post-graduate student

E-mail: [hani\\_2012@mail.ru](mailto:hani_2012@mail.ru)**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st.1

**Experimental studies of bearing capacity and settlement  
of foundations of clay soils under block regime cyclic loading****Abstract**

*Problem statement.* Experimental studies of bearing capacity and settlement of foundations of clay soils under block regime cyclic loading were carried out. Conducting lot tests with the help of an automated system program (ASIS), allowed to determining settlement of base, stress and strain in the soil.

*Results.* The results of experimental studies are presented in the form of graphs of precipitation and deformation depending on the loading mode. New data were obtained on the regularities of stress-strain clay soils under block cyclic loading.

*Conclusions.* The significance of the results obtained for the construction is that with regime block cyclic loads there is an increase in the deformation of the soil within the compressible strata, as well as the settlement of the base with different intensity in all the load blocks. The most intensive development of deformations of the soil and sediment of the base occurred at the initial stage of loading up to 300 cycles, when passing to the second stage stabilization occurred up to 2700 cycles. The loss of bearing capacity occurs at the third stage of

loading after reaching the limit state of the soil mass below the slab foundation.

**Keywords:** block cyclic loading, clay soil, settlement, stress, deformation.

### References

1. Andersen K. H. Bearing capacity under cyclic loading offshore, along the coast and on land // NRC Research press 2007. P. 513–535.
2. Adrian F. L., Yasuhara K., Hirao K. Stability criteria for marine clay under one way cyclic loading. Geotech Engng. 1993. P. 1771–1789.
3. Yasuhara K., Murakami S., Noritaka T., Adrian F. L. Settlements in fine-grained soils under cyclic loading // Soils and foundations. Japanese geotechnical society. 2001. P. 25–36.
4. Jia J. Dynamic and cyclic properties of soils // Soil dynamics and foundation modeling // Springer international publishing Ag. 2018. P. 75–108.
5. Braja M. D, Eun C. S. Cyclic load-induced settlement of foundations on clay. Fourth International conference on case histories in Geotech. Engng. 1998. P. 224–226.
6. Gol'dshteyn M. N. Mechanical properties of soils: Stress-deformative strength characteristics. M. Stroyizdat. 1979. 304 p.
7. Denisenko V. V., Lyashenko P. A. Hardening and softening of clay soil // Nauchnyy zhurnal KubGAU. 2016. № 120. P. 61–67.
8. Sedin V. L., Vinnikov U. L., Bixu K. M. The effect of repeated loads of packed piles in punched wells on the deformability of their bases // Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura. 2014. № 3. P. 112–120.
9. Shakirov I. F., Garifullin D. R. Investigation of the soil massif strengthened by pressure carburizing : dig. of art. VIII international. Scientific and practical. Conference Actual issues of science, technology and production / SPbGASU. St. Petersburg, 2015. P. 80–83.
10. Lyashenko P. A., Gokhayev D. V., Schmidt O. A. Evaluation of changes in the deformation characteristics of clay soils at the base of bored piles under repeated loading // Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura. 2016. № 4. P. 123–132.