

УДК 624.159.11

Мирсаяпов Ильшат Талгатович

доктор технических наук, профессор

E-mail: itmir@kgasu.ru

Никитин Георгий Петрович

кандидат технических наук, доцент

E-mail: g.nikitin@gap-rt.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

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

Ханбеков Мидхат Фаридович

начальник группы ОГК

E-mail: m.khanbekov@gap-rt.ru

Мирсаяпов Арслан Илшатович

инженер

E-mail: a.mirsayapov@gap-rt.ru

АО «Казанский Гипронефтепром»

Адрес организации: 420127, Россия, г. Казань, ул. Дементьева, д. 1

Натурные испытания плитного фундамента под высокоточное оборудование с имитацией работы подвижной части станка поэтапным нагружением

Аннотация

Постановка задачи. Целью проведения натурных испытаний ставилось исследование фундамента и массива грунта при поэтапном нагружении фундамента с оценкой его предельного прогиба и крена.

Результаты. Основные результаты исследования состоят в определении напряжённо-деформированного состояния системы «фундамент-станина», выявлении закономерности прогиба плитного фундамента и его крене при работе подвижной части станка.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в выборе типа фундамента под высокоточное оборудование с подвижными частями, установлении его оптимальных габаритов, с учётом инженерно-геологических условий.

Ключевые слова: плитный фундамент, натурные испытания, высокоточное оборудование, осадки и крен фундамента, жёсткость системы «фундамент-станина».

Введение

Современная промышленность в настоящее время создаёт оборудование, которое позволяет увеличить скорость, и точность изготовления различных деталей для машиностроения. Само оборудование состоит из множества подвижных частей, имеющих большую массу. Для такого оборудования требуется устройство надёжного и прочного основания. Чаще всего таким основанием является массивная монолитная железобетонная плита большой толщины, прямоугольная в плане, с множеством прямиков и колодцев для последующего монтажа элементов оборудования и их закрепления. Во время движения подвижных частей оборудования, фундамент испытывает периодическое воздействие циклических статических и динамических нагрузок, которые передаются от фундамента на грунтовый массив. Проблеме исследований напряжённо-деформированного состояния и вертикальных перемещений системы «грунт-фундамент-сооружение», при различных нагружениях, посвящены работы [1-10].

Исследуемый фундамент

Размеры фундамента в плане 15,6×9,25 м, толщина 1,5 м (бетон В25W6F75, арматура А500С) приняты с учётом размеров оборудования, а также с учётом требований СП 26.13330.2012 «Фундаменты машин с динамическими нагрузками» и инженерно-геологических условий строительной площадки. В центральной части фундамента расположен прямик глубиной 340 мм для монтажа рабочего стола (на стол устанавливается заготовка из металла, из которой изготавливается деталь). По краям

фундамента – ниши глубиной 35 мм, для монтажа опорных станин (станина состоит из вертикальных опор и распределительной балки – траверсы, по которой перемещается подвижная часть оборудования) (рис. 1 а-б).

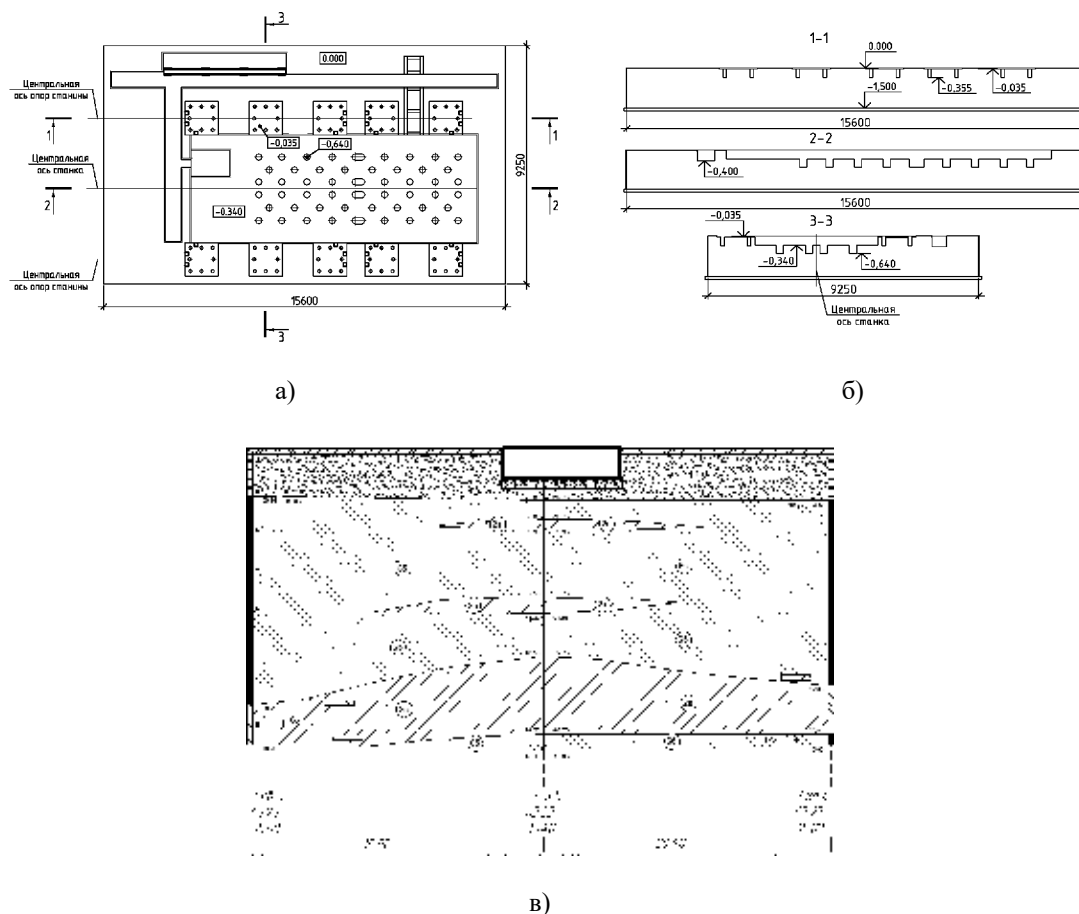


Рис. 1. Исследуемый фундамент: а) план; б) продольные и поперечный разрезы; в) инженерно-геологический разрез (иллюстрация авторов)

Параметры нагрузки на фундамент: вес станка – 110 т (в том числе подвижной части – 35 т, перемещающейся циклически по станине со скоростью 0,01 м/с между каждой пар станин); на грунтовое основание, кроме этого, действует ещё вес фундамента – 450 т.

Под подошвой фундамента залегают следующие слои и основания:

- бетонная подготовка (бетона В7.5), толщиной 100 мм;
- щебень М-600, толщиной 500 мм;

– насыпной слой (грунт разнородный, слежавшийся, отсыпан сухим способом в 1987 г., с преобладанием песка мелкого малой степени водонасыщения).

Инженерно-геологические условия строительной площадки

При изучении инженерной геологии (рис. 1в) строительной площадки использовались архивные материалы (1975 г., 2013 г., 2015 г.) для сопоставления полученных результатов. Можно отметить, что изменений в геолого-литологическом строении, гидрогеологических условиях, физико-механических свойствах грунтов площадки не произошло.

Геолого-литологический состав грунта сложен следующими слоями:

- бетонное основание пола, толщиной 350 мм;
- 1а – насыпной слой, мощностью 2,3 – 2,5 м (со следующими характеристиками: $\rho = 2,01 \text{ г/см}^3$; $\varphi = 28^\circ$; $C = 7 \text{ кПа}$; $E = 20,9 \text{ МПа}$);
- 6б – песок мелкий, водонасыщенный, мощностью 10,5-13,0 (со следующими характеристиками: $\rho = 2,02 \text{ г/см}^3$; $\varphi = 33^\circ$; $C = 2 \text{ кПа}$; $E = 28,05 \text{ МПа}$);

- 2в – суглинок мягкопластичной консистенции, мощностью 2,0-4,0 м (со следующими характеристиками: $\rho = 1,98 \text{ г/см}^3$; $\varphi = 10^\circ$; $C = 10 \text{ кПа}$; $E = 11,7 \text{ МПа}$).

Проведение испытания фундамента

Необходимость в проведении испытаний вызвана дополнительными требованиями завода-изготовителя оборудования по предельному прогибу фундамента равному 0,06 мм на длине 15,6 м, и общему крену фундамента равному 0,012 мм/м, заданными после изготовления фундамента.

Применённые измерительные приборы и поэтапная схема испытаний (рис. 2).



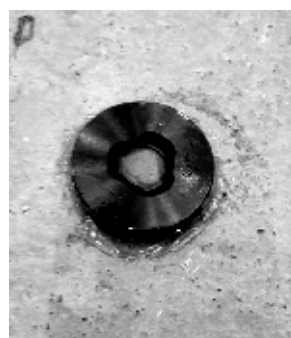
а)



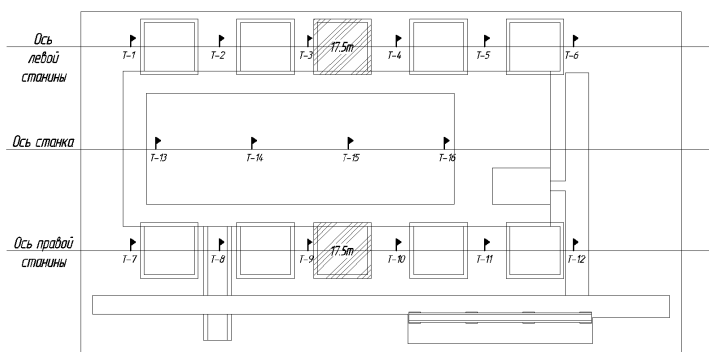
б)



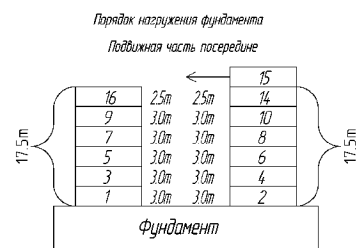
в)



г)



д)



е)

Рис. 2. Поэтапное нагружение третьей пары станин равномерной нагрузкой по 17,5 т на обе станины:
 а) общий вид; б) лазерный трекер Radian R-50, подключённый к ноутбуку;
 в) отражатель лазерных лучей; г) контрольный маяк;
 д) схема приложения нагрузок и расстановки маяков; е) порядок нагружения станин (иллюстрация авторов)

Из-за небольшой скорости перемещения подвижной части по станине принят следующий режим нагружения – нечётные пары станин (между маяков Т-1, Т-2; Т-7, Т-8 – I пара, Т-3, Т-4; Т-9, Т-10 – II пара, Т-5, Т-6; Т-11, Т-12 – V пара) поэтапно загружаются до величины 15,0-20,0 т, 20,0-15,0 т, 17,5-17,5 т. При этом имитация перемещения подвижной части в крайнем левом и правом, центральном положениях полностью моделирует работу станка. Режим загрузки для третьей пары станин (рис. 2 а, д, е).

Программа проведения испытаний была разработана в соответствии с требованиями ГОСТ 8829-2018 «Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жёсткости и трещиностойкости». Измерения деформаций для пошаговой нагрузки проводились с выдержкой в 10 минут, для полной нагрузки – с выдержкой в 30 минут.

Загрузочные устройства – стальные плоские круглые плиты («блины») весом 1,0 т, 1,1 т, 1,25 т. Суммарный вес 35,0 т.

На момент проведения испытания нагружением температура окружающего воздуха в пределах 18 ± 1 °С.

При помощи лазерного трекера Radian R-50, с точностью измерения 0,01 мм (рис. 2б, обозначен полусферой на рис. 2д), проведено определение значений деформаций фундамента по равномерно расставленным на нём контрольным маякам (рис. 2г, обозначены флажком и буквой «Т» на рис. 2б). На контрольные маяки устанавливался отражатель лазерных лучей (рис. 2в), который принимает и отражает луч от трекера. Во время испытаний работа машин и механизмов вблизи фундамента была исключена, а также велись наблюдения за изменением температурно-влажностного режима при полном отсутствии колебаний воздуха. Во время перемены этих параметров измерения деформаций приостанавливались до стабилизации окружающей среды. Трекер установлен за пределами фундамента, чтобы снизить возможное влияние осадки фундамента на точность показаний трекера.

Результаты испытаний

Перед началом и после окончания испытаний осмотрена поверхность фундамента на наличие трещин. При испытаниях ширина их раскрытия не превысила 0,1 мм.

Результаты измерений вертикальных деформаций сведены в таблицу, для первой пары станин – отражены в табл. 1, для третьей пары – в табл. 2.

Таблица 1

№ ступени загруз.	Пошаговая нагрузка на фундамент		Показания лазерного трекера при измерении вертикальных деформаций, в мм																	
			Контрольные точки по оси левой станины (л.с.)						Контрольные точки по оси правой станины (п.с.)						Контрольные точки по оси стола					
			Т-1	Т-2	Т-3	Т-4	Т-5	Т-6	Т-7	Т-8	Т-9	Т-10	Т-11	Т-12	Т-13	Т-14	Т-15	Т-16	Т-17	
0	0%	0%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
1	15% - 3,0 т	15% - 3,0 т	-0,16	-0,11	-0,04	-0,04	-0,01	0,02	0,00	-0,17	-0,15	-0,11	-0,11	-0,04	-0,01	-0,10	-0,12	-0,03	-0,04	-0,05
2	30% - 6,3 т	30% - 6,3 т	-0,12	-0,09	-0,04	-0,03	-0,02	0,00	-0,18	-0,16	-0,13	-0,10	-0,04	-0,02	-0,03	-0,08	-0,12	-0,05	-0,05	-0,06
3	45% - 8,8 т	45% - 8,8 т	-0,19	-0,12	-0,10	-0,08	-0,05	-0,03	-0,20	-0,19	-0,12	-0,09	-0,06	-0,03	-0,19	-0,15	-0,14	-0,09	-0,09	-0,09
4	60% - 11,8 т	60% - 11,8 т	-0,23	-0,18	-0,14	-0,10	-0,07	-0,03	-0,26	-0,25	-0,17	-0,12	-0,06	-0,04	-0,05	-0,16	-0,13	-0,09	-0,09	-0,08
5	75% - 15,0 т	75% - 15,0 т	-0,25	-0,19	-0,15	-0,10	-0,08	-0,03	-0,25	-0,19	-0,13	-0,09	-0,05	-0,03	-0,18	-0,16	-0,14	-0,11	-0,09	-0,09
6	100% - 20,0 т	75% - 15,0 т	-0,26	-0,24	-0,15	-0,11	-0,06	-0,05	-0,27	-0,25	-0,16	-0,13	-0,07	-0,04	-0,23	-0,19	-0,14	-0,09	-0,09	-0,09

Продолжение таблицы 1

7	75% - 15,0 т	75% - 15,0 т	-0,27	-0,20	-0,16	-0,11	-0,07	-0,04	-0,32	-0,28	-0,15	-0,15	-0,08	-0,04	-0,28	-0,18	-0,16	-0,09	-0,08
8	75% - 15,0 т	100% - 20,0 т	-0,24	-0,19	-0,13	-0,01	-0,06	-0,04	-0,27	-0,26	-0,14	-0,13	-0,06	-0,03	-0,22	-0,16	-0,12	-0,09	-0,08
9	87,5% - 17,5 т	87,5% - 17,5 т	-0,23	-0,18	-0,12	-0,09	-0,07	-0,05	-0,25	-0,24	-0,17	-0,11	-0,07	-0,04	-0,23	-0,17	-0,14	-0,09	-0,07
10	0%	0%	-0,15	-0,09	-0,08	-0,04	-0,03	0,01	-0,13	-0,14	-0,03	0,02	-0,01	0,00	-0,10	-0,09	-0,02	-0,01	0,00

Таблица 2

№ ступени загруз.	Пошаговая нагрузка на фундаментам л.с. п.с.		Показания лазерного трекера при измерении вертикальных деформаций, в мм																	
			Контрольные точки по оси левой станины (л.с.)						Контрольные точки по оси правой станины (п.с.)					Контрольные точки по оси стола						
			T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	T-6	T-7	T-8	T-9	T-10	T-11	T-12	T-13	T-14	T-15	T-16	T-17	
0	0%	0%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	15% - 3,0 т	15% - 3,0 т	-0,09	-0,10	-0,10	-0,05	-0,05	-0,05	-0,12	-0,08	-0,07	-0,01	-0,07	-0,05	-0,08	-0,05	-0,07	-0,03	-0,03	-0,03
2	30% - 6,3 т	30% - 6,3 т	-0,10	-0,11	-0,10	-0,08	-0,08	-0,06	-0,15	-0,09	-0,10	-0,08	-0,07	-0,05	-0,09	-0,07	-0,05	-0,04	-0,04	-0,04
3	45% - 8,8 т	45% - 8,8 т	-0,12	-0,16	-0,17	-0,10	-0,11	-0,07	-0,18	-0,11	-0,13	-0,10	-0,07	-0,06	-0,11	-0,10	-0,11	-0,07	-0,06	-0,06
4	60% - 11,8 т	60% - 11,8 т	-0,07	-0,13	-0,15	-0,10	-0,10	-0,08	-0,11	-0,08	-0,08	-0,08	-0,09	-0,07	-0,05	-0,06	-0,06	-0,07	-0,06	-0,06
5	75% - 15,0 т	75% - 15,0 т	-0,10	-0,13	-0,15	-0,11	-0,10	-0,09	-0,10	-0,06	-0,06	-0,08	-0,08	-0,07	-0,03	0,01	-0,07	-0,08	-0,07	-0,07
6	100% - 20,0 т	75% - 15,0 т	-0,07	-0,15	-0,17	-0,11	-0,13	-0,08	-0,06	-0,05	-0,08	-0,08	-0,08	-0,07	0,00	-0,05	-0,07	-0,07	-0,07	-0,04
7	75% - 15,0 т	75% - 15,0 т	-0,09	-0,12	-0,13	-0,08	-0,10	-0,08	-0,08	-0,04	-0,10	-0,09	-0,07	-0,08	0,00	-0,09	-0,08	-0,07	-0,07	-0,07
8	75% - 15,0 т	100% - 20,0 т	-0,03	-0,06	-0,07	-0,20	-0,11	-0,06	-0,10	-0,06	-0,06	-0,07	-0,10	-0,07	0,01	-0,03	-0,08	-0,09	-0,08	-0,08
9	87,5% - 17,5 т	87,5% - 17,5 т	-0,06	-0,11	-0,05	-0,12	-0,11	-0,08	-0,06	-0,04	-0,08	-0,10	-0,09	-0,08	-0,04	-0,09	-0,10	-0,08	-0,08	-0,06
10	0%	0%	-0,05	-0,09	-0,02	0,00	-0,05	-0,02	-0,05	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	-0,02	-0,01	-0,02	-0,02

Аналізу подвергались значения вертикальных деформаций при полном загрузении (ступени загрузения № 6, 8, 9). После анализа таблиц, для наглядности, были построены графики зависимостей для ступеней загрузения № 6: «приложенная нагрузка — вертикальные деформации» (рис. 3).

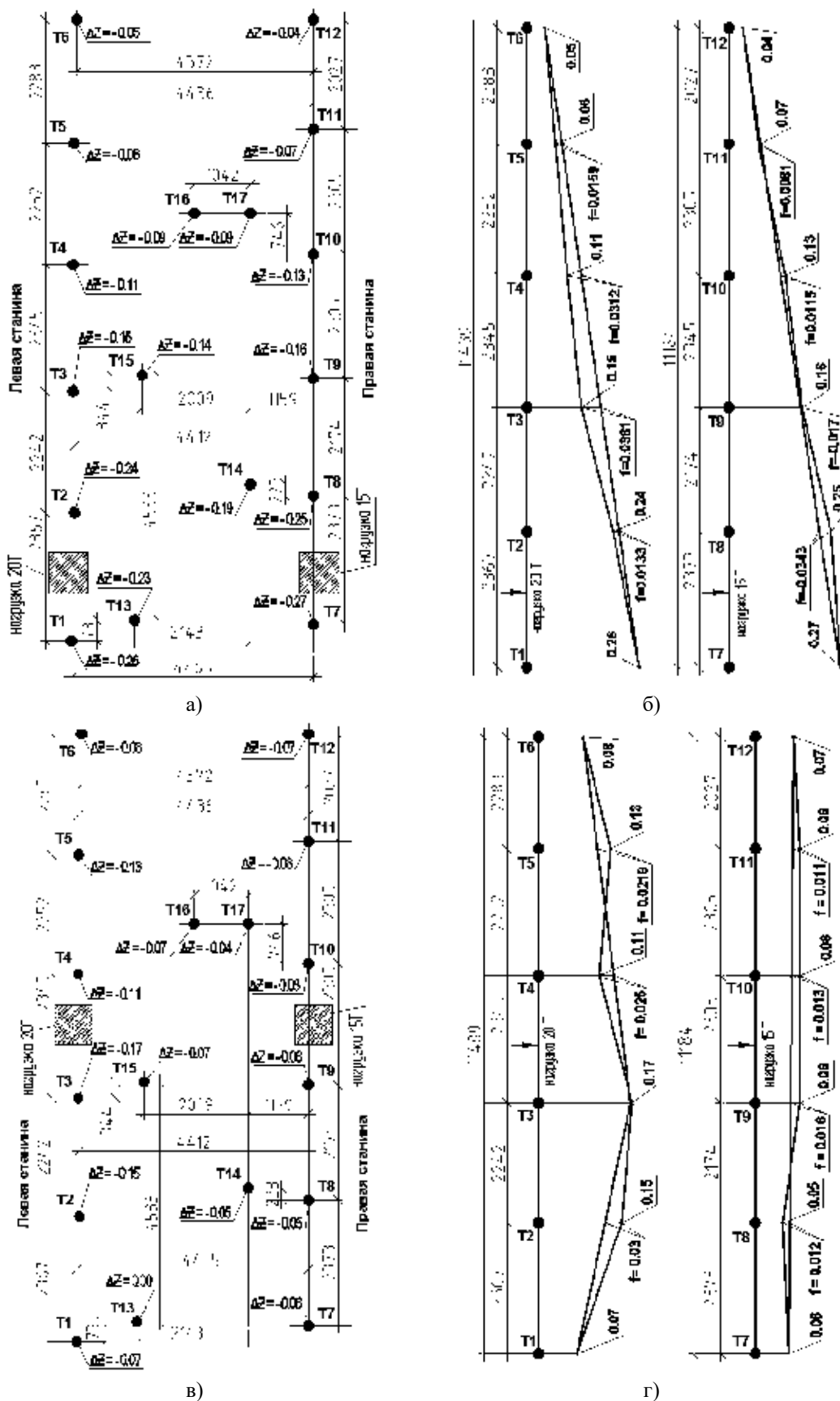


Рис. 3. Графики зависимостей: а), в) фактическое положение контрольных маяков в плане со значениями вертикальных перемещений для первой и третьей пар стаций соответственно; б), г) значения вертикальных деформаций от приложенной нагрузки (иллюстрация авторов)

Выводы по результатам испытаний

1. Величина максимального прогиба фундамента составляет 0,008-0,040 мм, что меньше заданного критерия – 0,06 мм.

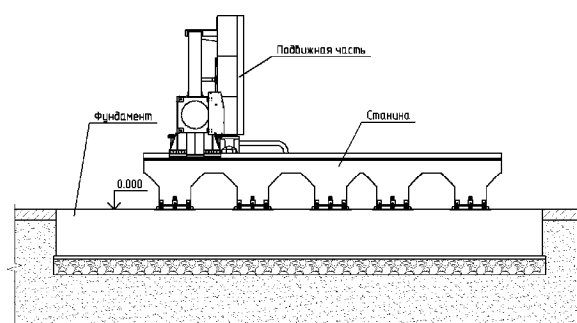
2. Общий крен фундамента составляет величину 0,0009-0,040 мм/м, что превышает заданный критерий – 0,012 мм/м.

3. С целью стабилизации осадок и увеличения общей жёсткости системы «фундамент-станина» произведена сборка оборудования (рис. 4). Станина представляет собой жёсткую рамную конструкцию, после её крепления анкерными болтами, значительно возрастает суммарная жёсткость системы «фундамент-станина».

4. После монтажа станка выполненные повторно замеры показателей прогибов и крена фундамента не превышают заданных критериев. Несущая способность и прочность системы «фундамент-станина» достаточны для надёжной эксплуатации оборудования.



а)



б)

Рис. 4. Система «фундамент-станина»:

а) общий вид; б) схема расположения оборудования на фундаменте (иллюстрация авторов)

Заключение

Основными критериями при выборе плитного фундамента под оборудование является его большая масса и жёсткость. Имитация работы подвижных частей поэтапным нагружением наиболее точно описывает напряжённо-деформированное состояние системы «грунт-фундамент-оборудование», в том числе показывает порядок цифр прогиба и крена. Пуско-наладочные работы с циклическим нагружением (постепенная сборка станины, стола, подвижной части с её перемещениями по станине) приводят к стабилизации осадок и возрастанию суммарной жёсткости системы «фундамент-станина».

Список библиографических ссылок

1. Mirsayapov Ilshat T., Shakirov M. I. Bearing capacity and settlement of raft-pile foundation under cyclic loading : dig. of art. 1st International conference on energy geotechnics / ICEGT. Kiel. Germany. 2016. P. 423–428.
2. Mirsayapov Ilizar T., Koroleva I. V., Shakirzyanov D. D. Calculation model of foundation base settlement at the static and cyclic regime loading : dig. of art. 1st International conference on energy geotechnics / ICEGT. Kiel. Germany. 2016. P. 429–434.
3. Mirsayapov Ilizar T., Koroleva I. V. Long-term Settlements Assessment of High-rise Building Groundbase Based on Analytical Ground Deformation Diagram : Proc. intern. symp. St. Petersburg, Russian Federation. ACUUS 2016. 15th International Scientific Conference «Underground Urbanisation as a Prerequisite for Sustainable Development». Vol. 165. 2016. P. 519–527.

4. Пономарёв А. Б., Сычкина Е. Н. Экспериментальные полевые исследования деформируемости аргиллитоподобных глин и песчаников // Вестник МГСУ. 2018. Том 13. № 6 (117). С. 756–767.
5. Игнатов С. В. Комплексные исследования несущей способности оснований фундаментов и каркаса здания в условиях реконструкции // Вестник ПГУ. Серия F: Строительство. Прикладные науки. 2017. № 16. С. 77–86.
6. Наумкина Ю. В. Экспериментальные исследования взаимодействия системы усиления ленточных фундаментов с предварительно напряжённым грунтовым основанием // Вестник гражданских инженеров. 2013. № 1 (36). С. 73–77.
7. Евтушенко С. И., Шутова М. Н., Калафатов Д. А. Анализ сходимости результатов опытов и результата расчёта МКЭ на примере конструкций плитного фундамента // Вестник ВГАСУ. Серия: Строительство и архитектура. 2018. № 53 (72). С. 15–24.
8. Мишин С. А., Борозенец Л. М. Экспериментальное исследование несущей способности и деформации основания одиночной буровой сваи и односвайно-плитного фундамента // Молодой учёный. 2016. № 7. С. 120–128.
9. Димов Л. А., Димов И. Л., Богушевская Е. М. Осадка и крен крупного резервуара для нефти при гидравлическом испытании // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2017. № 3. С. 31–35.
10. Сабитов Л. С., Кашапов Н. Ф., Киямов И. К., Стрелков Ю. М. Теоретико-экспериментальный метод определения напряжённо-деформированного состояния тест-образца «опора-фундамент-грунт» // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 10. С. 27–30.

Mirsayapov Ilshat Talgatovich

doctor of technical sciences, professor

E-mail: itmir@kgasu.ru**Nikitin Georgy Petrovich**

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: g.nikitin@gap-rt.ru**Kazan state University of Architecture and Engineering**

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

Khanbekov Midkhat Faridovich

head of OGK group

E-mail: m.khanbekov@gap-rt.ru**Mirsayapov Arslan Ilshatovich**

engineer

E-mail: a.mirsayapov@gap-rt.ru**JSC «Kazan Giproniaviaprom»**

The organization address: 420127, Russia, Kazan, Dementev st., 1

**Full-scale tests of the slab foundation for high-precision equipment
with simulation of the moving part of the machine by gradual loading****Abstract**

Problem statement. The purpose of full-scale tests was to study the foundation and the soil mass at the stage-by-stage loading of the foundation with the assessment of its ultimate deflection and roll.

Results. The main results of the study are to determine the stress-strain state of the system «foundation-frame», to identify patterns of deflection of the slab foundation and its roll in the simulation of the moving part of the machine.

Conclusions. The significance of the results for the construction industry is to choose the type of foundation for high-precision equipment with moving parts, establishing its optimal dimensions, taking into account engineering-geological conditions.

Keywords: slab foundation, full-scale tests, high-precision equipment, precipitation and roll of the foundation, rigidity of the «foundation-frame» system.

References

1. Mirsayapov Ilshat T., Shakirov M. I. Bearing capacity and settlement of raft-pile foundation under cyclic loading : dig. of art. 1st International conference on energy geotechnics / ICEGT. Kiel. Germany. 2016. P. 423–428.
2. Mirsayapov Ilizar T., Koroleva I. V., Shakirzyanov D. D. Calculation model of foundation base settlement at the static and cyclic regime loading : dig. of art. 1st International conference on energy geotechnics / ICEGT. Kiel. Germany. 2016. P. 429–434.
3. Mirsayapov Ilizar T., Koroleva I. V. Long-term Settlements Assessment of High-rise Building Groundbase Based on Analytical Ground Deformation Diagram: Proc. intern. symp. St.Petersbug. Russian Federation. ACUUS 2016. 15th International Scientific Conference «Underground Urbanisation as a Prerequisite for Sustainable Development». Vol. 165. 2016. P. 519–527.
4. Ponomarev A. B., Siccine E. N. Experimental field studies of deformation of argillit-like clays and sandstones of // Vestnik MGSU. 2018. Vol. 13. № 6 (117). P. 756–767.
5. Ignatov S. V. Complex study of the bearing capacity of foundation and the building frame in terms of reconstruction // Vestnik PGU. Seriya F: Stroitel'stvo. Prikladnyye nauki. 2017. № 16. P. 77–86.
6. Naumkina Y. V. Experimental studies of the interaction of the reinforcement system of belt foundations with prestressed soil base // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2013. № 1 (36). P. 73–77.
7. Evtushenko S. I., Shutova M. N., Kalafatov D. A. Analysis of convergence of the results of experiments and calculation results of the finite element method on the example of slab foundation structures // Vestnik VGASU. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura. 2018. № 53 (72). P. 15–24.
8. Mishin S. A., Boroznets L. M. Experimental study of the bearing capacity and deformation of the base of a single drill pile and a single-pile slab foundation // Molodoy uchonyy. 2016. № 7. P. 120–128.
9. Dimov L. A., Dimov I. L., Bogushevskaya E. M. Sediment and roll of a large reservoir for oil during hydraulic testing // Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov. 2017. № 3. P. 31–35.
10. Sabitov L. S., Kashapov N. F., Kiyamov I. K., Strelkov Yu. M. Theoretical and experimental method for determining the stress-strain state of the test sample «support-foundation-soil» // Nauchno-tehnicheskiy vestnik Povolzh'ya. 2018. № 10. P. 27–30.