

УДК 624.15

Мурузина Е.В., кандидат технических наук, доцент каф. ПГСиСМ,
Набережночелнинский институт (филиал) ФГАОУ ВПО «Казанский
(Приволжский) Федеральный университет»

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОСНОВАНИЯ ФУНДАМЕНТОВ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ

Аннотация: При реконструкции производственного здания, как впрочем и любого другого, возникает необходимость в исследовании грунтового основания. Это связано с увеличивающимися нагрузками на фундаменты ввиду устройства дополнительных технологических резервуаров. Для анализа напряженно-деформированного состояния грунтового основания осуществлялся расчет деформаций существующего производственного корпуса и нового строительства. Расчет выполнялся двумя способами: аналитическим расчетом методом угловых точек и расчетом в программе Plaxis. Затем сравнивались результаты расчета с выявлением погрешности.

Ключевые слова: напряженно--деформированное состояние; основание фундаментов; существующее производственное здание; аналитический расчет; программный расчет; Plaxis

Введение

Проектирование любого здания начинается с расчета напряжений грунтового основания, возникающих вследствие как природного давления (пластов грунта, подземных рек), так и появляющихся со строительством [1-2]. По полученным расчетам стоятся эпюры напряжений грунта (схемы распределения напряжений), по которым выявляется граница сжимаемой толщи под каждым фундаментом. Все эти предварительные расчеты прямым образом влияют на конструирование с подбором формы и размера фундаментов здания, а также проверки условия осадки фундамента по отношению к нормативному документу [3].

В данной работе рассматривалось производственное здание, которое необходимо подвергнуть реконструкции (в том числе фундаментов), включающее монтаж дополнительных технологических резервуаров. Для анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтового основания

выполнялся расчет деформаций фундаментов существующего производственного корпуса, попадающего в зону влияния нового строительства.

В последнее время в связи введением Цифровой экономики говорится о повсеместном применении расчетных программ, включая строительную отрасль [4]. В работе расчет выполнялся двумя способами: аналитическим расчетом методом угловых точек и расчетом в программе Plaxis. Затем сравнивались результаты расчета и были сделаны выводы.

Нагрузки вновь возводимых фундаментов

В зону рассмотрения нового строительства попали существующие фундаменты в квадрате осей 25-28', 30-33; А-Б₂/Б₁ здания. План (фрагмент) расположения фундаментов представлен на рис. 1. Штриховкой обозначены проектируемые, другим типом штриховки - существующие фундаменты.

В результате анализа нагрузок выбрана комбинация, передающая максимальные усилия на свайный фундамент. Нагрузка на ростверки РМ-1 и РМ-2 составит 32 т/м².

Грузовые площади ростверков РМ-1 и РМ-2:

$$S_{cm} = \pi R^2 = 3,14 \cdot 3,42^2 = 36,73 \text{ м}^2;$$

$$S_{пл} = a^2 = 8,2^2 = 67,24 \text{ м}^2.$$

Давление по подошве ростверка составит:

$$p = \frac{S_{cm} \cdot N}{S_{пл}} = \frac{36,73 \cdot 32}{67,24} = 17,48 \text{ т/м}^2 = 171,5 \text{ кПа}.$$

Существующие фундаменты здания

Существующие фундаменты здания – столбчатые, глубина заложения 2,7 м от уровня чистого пола корпуса. Под устройство существующих резервуаров выполнена опорная плита, передающая нагрузку на 5 рядов ленточных фундаментов. Ленточные фундаменты сборные, ширина подошвы 1,2 м, глубиной заложения 2,5 м от уровня чистого пола корпуса. Ленточные фундаменты предусмотрены также для ограждающих конструкций корпуса.

Нагрузки на существующие фундаменты приведены в табл.1.

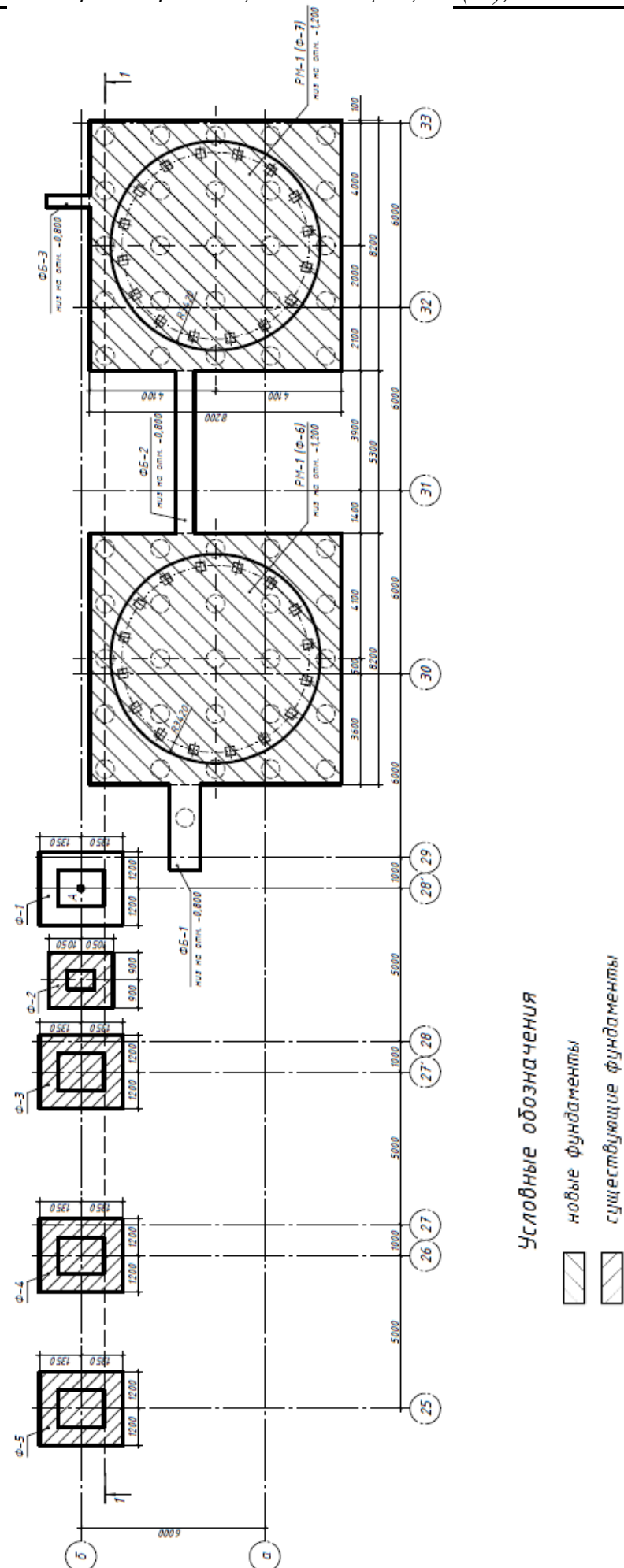


Рис. 1. План (фрагмент) расположения фундаментов

Таблица 1. Нагрузки на существующие фундаменты

№п/п	Фундамент	Нагрузка, кПа
1.	Ленточные фундаменты под ограждающие конструкции	50
2.	Столбчатые фундаменты по оси А	137
3.	Столбчатые фундаменты по оси А2/А1	198
4.	Столбчатые фундаменты по оси А3	195
5.	Столбчатые фундаменты по оси Б/Б1 и Б2/Б1	80
6.	Столбчатые фундаменты по оси Б	80
7.	Ленточные фундаменты под существующие резервуары	168

Дополнительная осадка фундаментов при реконструкционных работах

Для расчета дополнительной осадки рассматривались фундаменты в осях 25-33/А-Б.

Выполним расчет аналитическим и численным методом в программе Plaxis 2D. Произведем расчет фундамента Ф-1, расположенного в осях 28'/Б. Расположенные рядом в плане фундаменты Ф-2...Ф-5 оказывают влияние на фундамент Ф-1 и, соответственно, увеличивают значение его осадки. Данная осадка должна была стабилизироваться со временем, но при реконструкции на Ф-1 начинают влиять уже свайные фундаменты Ф-6 и Ф-7, которые вызовут дополнительную осадку Ф-1.

Аналитическое определение дополнительной осадки

Для определения дополнительной осадки фундамента Ф-1 аналитически использовался метод угловых точек. В соответствии с этим методом вертикальные напряжения $\sigma_{zp,a}$ на глубине z от подошвы фундамента по вертикали, проходящей через произвольную точку А, вычисляют алгебраическим суммированием напряжений $\sigma_{zp,cj}$ в угловых точках четырех фиктивных фундаментов по формуле

$$\sigma_{zp,a} = \sum_{j=1}^4 \sigma_{zp,cj} \quad (1)$$

Вертикальные напряжения $\sigma_{zp,nf}$ на глубине z от подошвы фундаменты по вертикали, проходящей через центр рассчитываемого фундамента, с учетом влияния соседних фундаментов на прилегающие площади вычисляют по формуле:

$$\sigma_{zp,nf} = \sigma_{zp} + \sum_{i=1}^k \sigma_{zp,ai} , \quad (2)$$

где σ_{zp} – среднее значение вертикального нормального напряжения от внешней нагрузки в i -м слое грунта по вертикали, проходящей через центр подошвы фундамента, кПа;

$\sigma_{zp,ai}$ – вертикальные напряжения от соседнего фундамента;

k – число влияющих фундаментов.

Напряжение σ_{zp} в формуле (2) определяется с помощью коэффициента $\alpha=f(\eta=l/b; \zeta=2z/b)$ по табл. 5.8 [3], а для $\sigma_{zp,ai}$ коэффициент $\alpha=f(\eta=l/b; \zeta=z/b)$.

Для учета влияния каждого из фундаментов Ф-2...Ф-7 составлялась схема фиктивных фундаментов. Дополнительные напряжения от каждого из фиктивных фундаментов входят в формулу (1) со своим знаком. На рис. 2 представлена схема фиктивных фундаментов Ф-2.

Необходимо учесть, что дополнительная нагрузка от фундаментов Ф-2...Ф-5 передается в уровне подошвы ростверка Ф-1 в отличие от свайных фундаментов Ф-6 и Ф-7. Нагрузка от вышележащих конструкций через ростверк фундамента передается на сваи, которые в свою очередь передают нагрузку на грунтовое основание. Таким образом, на глубине $z = 14,7$ м относительно подошвы фундамента Ф-1 возникают напряжения, вызывающие дополнительную осадку.

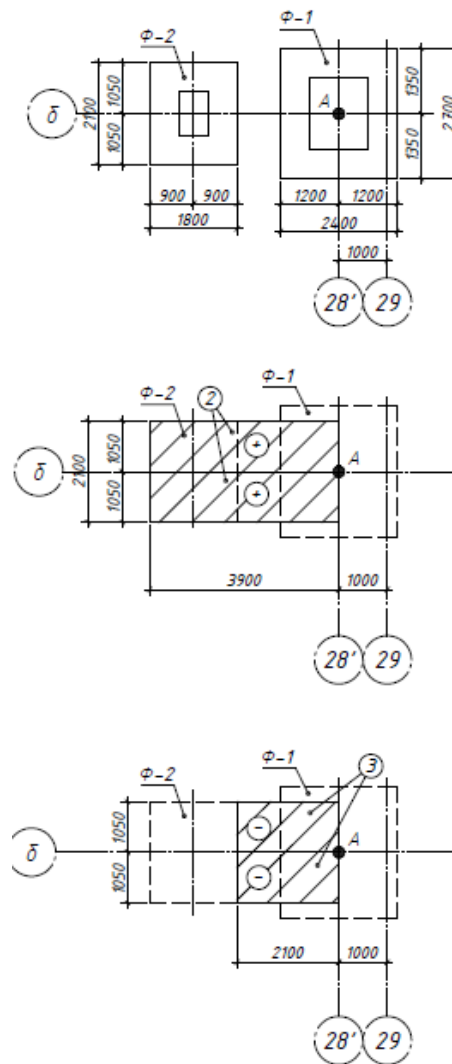


Рис. 2. Схема фиктивных фундаментов Ф-2

С учетом влияния соседних фундаментов и равенства нагрузок $p_1=\dots=p_5=135$ кПа и $p_6=p_7=196,5$ кПа (с учетом собственного веса ростверка) получаем ($p_1\dots p_5$ – давление на подошву столбчатых фундаментов Ф-1...Ф-5, p_6 и p_7 – давления по подошве условных свайных фундаментов):

$$\begin{aligned} \sigma_{zp,nf} = \sigma_{zp} + \sum_{i=1}^7 \sigma_{zp,ai} = \alpha_1 p_1 + \frac{2(\alpha_2 - \alpha_3)}{4} p_2 + \frac{2(\alpha_4 - \alpha_5)}{4} p_3 + \frac{2(\alpha_6 - \alpha_7)}{4} p_4 + \\ + \frac{2(\alpha_8 - \alpha_9)}{4} p_5 + \frac{2(\alpha_{10} - \alpha_{11})}{4} p_6 + \frac{2(\alpha_{12} - \alpha_{13})}{4} p_7 = (\alpha_1 + 0.5(\alpha_2 - \alpha_3 + \alpha_4 - \alpha_5 + \\ + \alpha_6 - \alpha_7 + \alpha_8 - \alpha_9)) p_1 + 0.25 p_6 (\alpha_{10} - \alpha_{11} + \alpha_{12} - \alpha_{13}) = \alpha_{сум.1} p_1 + \alpha_{дон.2} p_6 = \sigma_{zp,сум.1} + \sigma_{zp,дон} \end{aligned} \quad (3)$$

где $\alpha_2\dots\alpha_{13}$ – коэффициенты фундаментов Ф-2...Ф-7, но $\alpha_8 = \alpha_9$, следовательно, $\alpha_8 - \alpha_9 = 0$.

$$\alpha_{дон.1} = (\alpha_2 - \alpha_3 + \alpha_4 - \alpha_5 + \alpha_6 - \alpha_7 + \alpha_8 - \alpha_9) \quad (4)$$

$$\alpha_{сум.1} = 0.5 \alpha_{дон.1} \quad (5)$$

Осадка s основания фундамента Ф-1 вычислялась методом послойного суммирования с использованием расчетной схемы в виде линейно деформируемого полупространства. Учитывая, что глубина заложения Ф-1 $d_f = 2,55$ м меньше 5 м, а также отсутствует информации о размерах котлована для существующих фундаментов, формула для расчета осадки примет вид:

$$s = \beta \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zp, nf} h_i}{E_i}, \quad (6)$$

где h_i - толщина i -го слоя грунта, см, принимаемая не более 0,4 ширины фундамента;

E_i - модуль деформации i -го слоя грунта по ветви первичного нагружения, кПа.

Нижнюю границу сжимаемой толщи основания принимаем на глубине $z = H_c$, где выполняется условие:

$$\sigma_{zp} = 0.2 \sigma_{zg}, \quad (7)$$

где σ_{zg} – вертикальное эффективное напряжение от собственного веса грунта.

Результаты расчета дополнительных напряжений и осадки с учетом существующих фундаментов были сведены в таблицы. Схема к расчету осадки (эпюра напряжений) Ф-1 представлена на рис. 3.

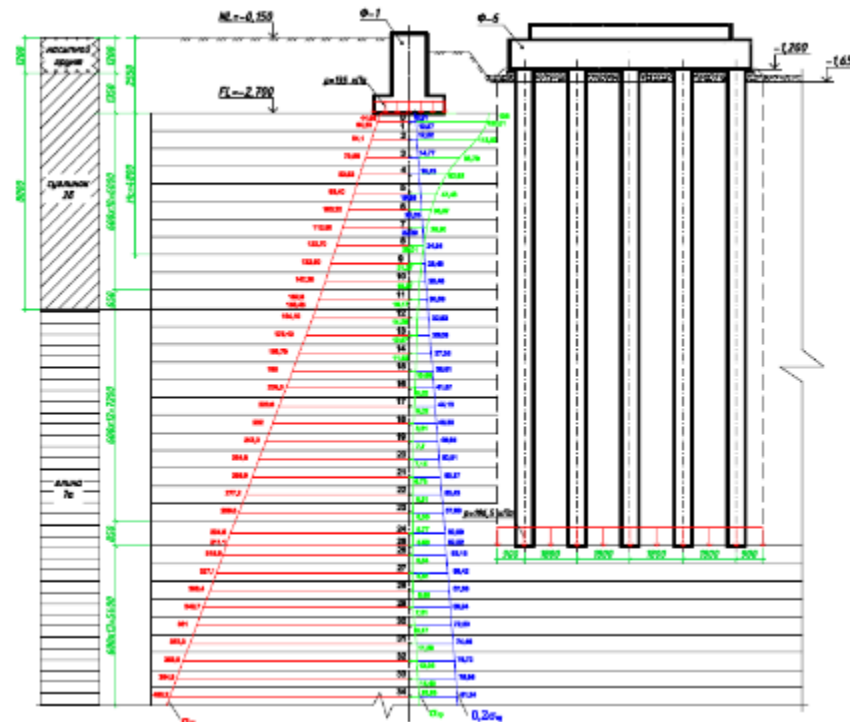


Рис. 3. Эпюра напряжений фундамента Ф-1

Под действием собственной нагрузки, а также от влияния Ф-2...Ф-5 осадка Ф-1 составила $s_2 = 4,13$ см. Мощность сжимаемого слоя по расчету $H_{c, \text{расчет}} = 4,8$ м.

Однако, $H_{c.min} = 6,65$ м, т.к. находится в суглинке с модулем деформации $E = 6,2$ МПа < 7 МПа. Таким образом, принимаем $H_c = 6,65$ м. Заметим, что собственная осадка Ф-1 составляет $s_1 = 3,73$ см, что говорит о незначительном влиянии Ф-2...Ф-5 на Ф-1: $\Delta s = s_2 - s_1 = 0,4$ см. Осадка фундамента $s_2 = 4,13$ см меньше предельно допустимой осадки $s_u^{max} = 15$ см [3], что удовлетворяет условию.

Точка 0 соответствует подошве Ф-1, точка 25 – подошве условных фундаментов Ф-6 и Ф-7, точки 26...34 – центры тяжести элементарных слоев грунта. На глубине 14,7 м (т. 25) от подошвы Ф-1 возникают дополнительные напряжения $\sigma_{zp,доп}$, в результате суммарное напряжение от внешней нагрузки $\sigma_{zp,сум,2}$ перестает уменьшаться с глубиной и начинает расти. Но $\sigma_{zp,сум,2}$ растет медленнее, чем $0,2\sigma_{zg}$ и имеет значения существенно ниже, что позволяет сделать вывод о том, что согласно методу угловых точек дополнительной осадки Ф-1 не произойдет.

Программное (численное) определение дополнительной осадки

Для определения дополнительной осадки фундамента Ф-1 было выполнено моделирование в программном комплексе Plaxis 2D в модели упрочняющегося грунта. Модель упрочняющегося грунта использует модуль разгрузки при снижении напряжений в элементе.

Для расчета осадки рассмотрим разрез 1-1 (разрез по оси Б). Размеры грунтового массива, принятого в модели, составляет 80×25 м². Расчетная схема приведена на рис. 4.

Характер работы грунта на контакте с бетонными элементами учитывался специальными интерфейсными элементами ($R_{inter} = 0,67$), понижающими характеристики грунта, в области устройства свай.

Нагрузка на столбчатые фундаменты $p_1 = 80$ кПа, на свайные составила $p_2 = 171,5$ кПа. Собственный вес фундаментов и грунта на уступах фундамента учтен программой. Последовательность строительства учитывалась фазами.

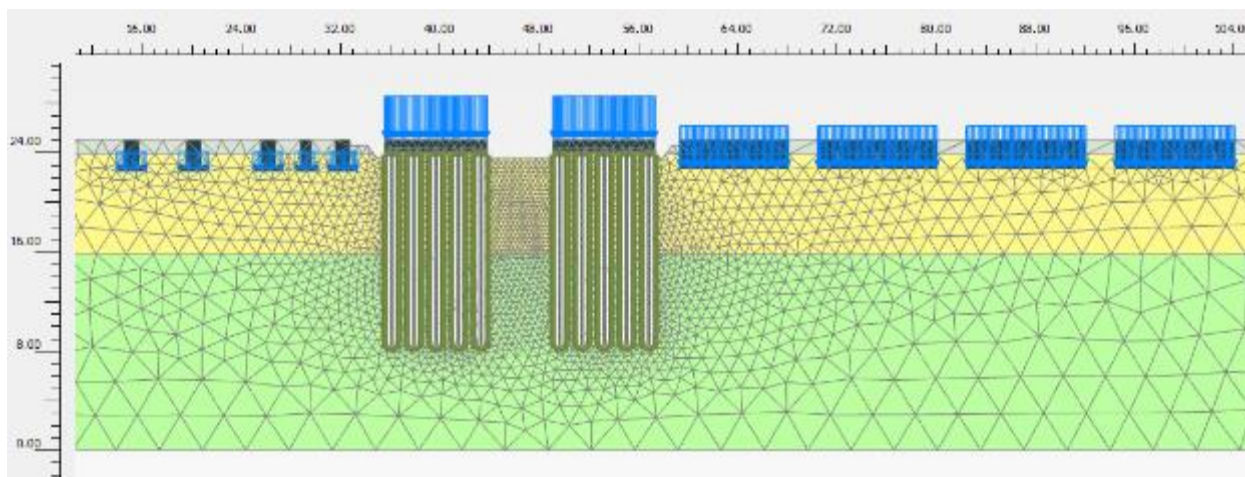


Рис. 4. Расчетная схема

Результаты расчета по лабораторным данным

Для анализа результатов расчета сведем деформации по подошвой Ф-1 по каждой фазе в табл.2. Знак «-» говорит об осадке, «+» - об поднятии подошвы Ф-1.

Таблица 2. Распределение деформаций по фазам

№ п/п	Фаза	Осадка s , см	Δs , мм
0	Начальная фаза (природные напряжения грунта)	0	-4,64
1	Фундамент Ф-1	-4,64	-4.81
2	Существующие фундаменты Ф-2...Ф-5(обнуление деформаций)	-9,36	+2,72
3	Рытье котлована	+2,72	-0,64
4	Устройство свай	+2,08	+4,98
5	Устройство ростверков и их нагружение	-2,9	

Фаза 1 моделирует собственную осадку Ф-1 $s_1=4,64$ см, фаза 2 моделирует влияние соседних существующих фундаментов Ф-2...Ф-5 на Ф-1.

$s_2=9,36$ см $< s_u^{\max} = 15$ см [3], что удовлетворяет условию.

Таким образом, $\Delta s=s_2-s_1=4,72$ см. Делаем вывод, что Ф-2...Ф-5 увеличивают осадку Ф-1 примерно в два раза.

Фаза 5 моделирует влияние реконструкции (т.е. Ф-6 и Ф-7) на Ф-1. Дополнительная осадка $s_{ad} = 2,9$ см $< s_{ad.u} = 3$ см, что удовлетворяет нормам [3].

Результаты расчета по данным зондирования сведены в табл.3.

Таблица 3 Распределение деформаций по фазам

№ п/п	Фаза	Осадка s, см	Δs , мм
0	Начальная фаза (природные напряжения грунта)	0	-2,06
1	Фундамент Ф-1	-2,06	-2,15
2	Существующие фундаменты Ф-2...Ф-5(обнуление деформаций)	-4,21	+1,24
3	Откопка котлована	+1,24	-0,28
4	Устройство свай	+0,96	-2,37
5	Устройство ростверков и их нагружение	-1,41	

Фаза 1 моделирует собственную осадку Ф-1 $s_1=2,06$ см, фаза 2 моделирует влияние соседних существующих фундаментов Ф-2...Ф-5 на Ф-1.

$$s_2=4,21 \text{ см} < s_u^{\max} = 15 \text{ см} [3], \text{ что удовлетворяет условию.}$$

Таким образом, $\Delta s=s_2-s_1=2,15$ см. Делаем вывод, что Ф-2...Ф-5 увеличивают осадку Ф-1 примерно в два раза.

Фаза 5 моделирует влияние реконструкции (т.е. Ф-6 и Ф-7) на Ф-1. Дополнительная осадка $s_{ad}=1,41 \text{ см} < s_{ad,u}=3 \text{ см}$, что удовлетворяет нормам [2].

Выводы

Сравнение результатов расчета численным методом по лабораторным данным и данным зондирования представлены в табл.4.

Таблица 4. Результаты вычислений осадки численным методом

Фундамент	Собственная осадка, см			Осадка с учетом влияния Ф-2...Ф-5, см			Дополнительная осадка от Ф-6 и Ф-7, см		
	лаб. дан.	зонд. дан.	лаб./зо нд.	лаб. дан.	зонд. дан.	лаб./зо нд.	лаб. дан.	зонд. дан.	лаб./зо нд.
Ф-1	4,64	2,06	2,25	9,36	4,21	2,22	2,9	1,41	2,06

Анализируя табл.6 можно сказать, что осадки, вычисленные по лабораторным данным, превышают осадки, полученные по данным зондирования примерно в 2,1...2,25 раза. При проведении зондирования грунт находится в ненарушенном сложении, поэтому значения модуля деформации существенно выше лабораторных данных.

Результаты расчета позволяют сделать вывод, что характеристики грунтов ухудшились в процессе выемки проб грунта, транспортировки и т.д., следовательно, грунты чувствительны к внешним воздействиям.

Также принимая во внимание, что зондирование не проводилось при полном водонасыщении грунтов основания, следовательно, оценить просадку грунта по данным зондирования не представляется возможным, поэтому о запасе прочности ориентироваться будем на расчеты по лабораторным данным.

Сравнение результатов расчета численным и аналитическим методом представлены в табл.5.

Таблица 5. Результаты вычислений осадки численным и аналитическим методом по лабораторным данным

Фундамент	Собственная осадка, см		относит. погреш., %	Осадка с учетом влияния Ф-2...Ф-4, см		относит. погреш., %	Доп. осадка от Ф-6 и Ф-7, см	
	ручной расчет (S _{руч})	plaxis (S _{plaxis})		ручной расчет (S _{руч})	plaxis (S _{plaxis})		ручной расчет (S _{руч})	plaxis (S _{plaxis})
Ф-1	3,73	4,64	19,6	4,13	9,36	55,9	-	2,9

Согласно табл. 7, влияние фундаментов Ф-2...Ф-4 на существующие аналитическим методом показало небольшую разницу в 0,4 см, в то время как при расчете численным методом осадка Ф-1 увеличивается в 2 раза $9,36/4,64 = 2,02$. Однако осадка Ф-1 в обоих случаях не превышает предельно допустимого значения.

Оценив данную таблицу можно сказать, что значения всех осадок в ПК Plaxis 2D получились больше значений, полученных при аналитических расчетах. Относительная погрешность составляет 19,6...55,9 %. Данное расхождение можно объяснить тем, что в расчетах использовались различные модели грунта. Для ручного расчета – метод линейно деформируемого полупространства, для численного расчета – модель упрочняющегося грунта; также, в отличие от аналитического расчета, программа использует метод конечных элементов (МКЭ) и учитывает этапность строительства, что тоже вносит вклад в расхождение результатов расчета. Но, тем не менее, результаты расчетов осадки имеют один порядок и удовлетворительную сходимость.

Следует заметить, что аналитически дополнительной осадки Ф-1 не возникает, в то время как в Plaxis её значение составляет 2,9 см, что удовлетворяет требованиям на предельных значениях.

Таким образом, можно сделать вывод, что для расчета осадок при сложной геометрии расчетной схемы, при наличии влияющих друг на друга фундаментов, Plaxis является более универсальным и менее трудоемким средством и при правильной постановке задачи дает реалистичные результаты, но несколько завышенные, в сравнении с ручным расчетом.

Список использованных источников

1. Фам Дык Кьонг. [Расчет напряженно-деформированного состояния гражданских сооружений и основания](#) //Вестник МГСУ. - 2008. - № 1. С.189-197.
2. Юшубе С.В., Подшивалов И.И. [Моделирование напряженно-деформированного состояния основания кирпичного здания повышенной этажности на монолитной фундаментной плите](#) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. - 2021. - т. 23. - № 2. - С. 118-132.
3. СП 22.13330-2016 Основания зданий и сооружений. Дата введения 01.07.2017.
4. Распоряжение Правительства РФ от 27 декабря 2021 года N 3883-р «О стратегическом направлении в области цифровой трансформации строительной отрасли, городского и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации до 2030 года» [URL://https://docs.cntd.ru/document/727688538](https://docs.cntd.ru/document/727688538) (дата обращения 01.02.2022)

Muruzina E.V., candidate of technical Sciences (PhD), assistant professor, Naberezhnye Chelny Institute of Kazan(Volga region) Federal University

ASSESSMENT OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE FOUNDATIONS DURING RECONSTRUCTION

Abstract: During the reconstruction of an industrial building, as well as any other, there is a need to study the soil foundation. This is due to the increasing loads on the foundations due to the installation of additional technological tanks. To analyze the stress-strain state of the soil base, deformations of the existing production building and new construction were calculated. The calculation was performed in two ways: analytical calculation by the method of angular points and calculation in the Plaxis program. Then the calculation results were compared with the error detection.

Key words: stress-strain state; foundation foundations; existing industrial building; analytical calculation; software calculation; Plaxis