



DOI: 10.15593/2224-9826/2017.4.11

УДК 624.131

УЧЕТ АНИЗОТРОПИИ ГРУНТОВ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ОСНОВАНИИ ФУНДАМЕНТОВ ОТ РЯДОМ ЗАГРУЖЕННЫХ ПЛОЩАДЕЙ

Л.В. Нуждин^{1,2}, К.В. Павлюк¹

¹Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин),
Новосибирск, Россия

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 05 июля 2017
Принята: 28 августа 2017
Опубликована: 15 декабря 2017

Ключевые слова:

деформационная анизотропия, осадки, напряжения, грунтовое основание, анизотропные грунты, напряженно-деформированное состояние грунта, метод послойного суммирования

АННОТАЦИЯ

Приведен анализ влияния деформационной анизотропии на напряженно-деформируемое состояние грунтового основания на основе численного эксперимента с использованием программного пакета ANSYS. Деформационные свойства грунта определялись модулем деформации E и коэффициентом Пуассона μ . Степень анизотропии задавалась исходя из определенного соотношения модулей деформации в вертикальном E_z и горизонтальном E_x направлениях $k_a = E_z/E_x$. В результате численного эксперимента были проанализированы трансверсально-изотропные грунтовые основания с коэффициентами деформационной анизотропии $k_a = 0,50; 0,75; 1,33; 2,0$ и получены дополнительные коэффициенты α' , которые используются при определении вертикальных напряжений от дополнительной нагрузки. На основе полученных результатов предложена методика расчета дополнительных напряжений анизотропного грунтового основания фундаментов существующей застройки от возводимых зданий и сооружений. В основу расчета положено решение задачи Лява с применением схемы линейно-деформируемого полупространства. Учет анизотропных свойств осуществлялся путем введения дополнительного коэффициента α' , который зависит от степени анизотропии грунтового основания k_a и геометрических размеров фундамента. Полученные результаты исследований показывают, что учет анизотропных свойств грунтов оказывает значительное влияние на напряженно-деформируемое состояние грунтового основания и позволяет наиболее обоснованно подходить к прогнозированию осадок фундаментов. Особенно важное значение учет деформационной анизотропии имеет при проектировании усиления грунтовых оснований с созданием наведенной анизотропии, в том числе при возведении рядом с существующим новых сооружений, или дополнительной загрузке прилегающих к фундаменту площадей.

© ПНИПУ

© **Нуждин Леонид Викторович** – кандидат технических наук, профессор, e-mail: nuzhdin_ml@mail.ru.
Павлюк Ксения Вячеславовна – аспирант, e-mail: xenia0822@mail.ru.

Leonid V. Nuzhdin – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: nuzhdin_ml@mail.ru.
Kseniia V. Pavliuk – Postgraduate Student, e-mail: xenia0822@mail.ru.

ACCOUNTING OF ANISOTROPY OF SOILS IN DETERMINING STRESSES IN FOUNDATION BASEMENT FROM NEAR LOADED AREAS

L.V. Nuzhdin^{1,2}, K.V. Pavliuk¹

¹Novosibirsk State University of Architecture
and Civil Engineering (Sibstrin), Novosibirsk, Russian Federation

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 05 July 2017
Accepted: 28 August 2017
Published: 15 December 2017

Keywords:

deformation anisotropy, settlements,
stresses, soil basement, anisotropic
soils, stress-strain state of soil, lay-
er-by-layer summation method

ABSTRACT

The article analyzes the effect of deformation anisotropy on the stress-strain state of the soil basement on the basis of a numerical experiment using the ANSYS software package. Strain properties of environment are determined by strain module E and Poisson's ratio μ . Degree of stress-strain anisotropy was evaluated based on ratio of deformation modules in vertical E_z and horizontal E_x directions $k_a = E_z/E_x$. Resulting from calculation experiments, transverse-isotropic environments were concerned with coefficients of stress-strain anisotropy $k_a = 0.5; 0.75; 1.33$ and 2 and additional coefficients α' are obtained, which are used in determining vertical stresses from the additional load. Based of obtained results a method is proposed for calculating the additional stresses of the anisotropic basement of the foundations of the existing building from the buildings and structures being erected. The calculation is based on the Lyave problem using the scheme of a linearly deformed medium. The anisotropic properties are taken into account by introducing an additional coefficient α' , which depends on the degree of anisotropy of the soil basement k_a and the geometric dimensions of the foundation. The obtained results of the studies show that taking into account the anisotropic properties of soils has a significant effect on the stress-strain state of the soil basement and allows the most reasonable approach to predicting the settlements of foundations. It is particularly important to consider deformation anisotropy when design of reinforced soil basement with the creation of induced anisotropy, including construction new facilities near existing building.

© PNRPU

В настоящее время специалистам все чаще приходится сталкиваться с проектированием зданий в условиях плотной городской застройки, когда, помимо выбора типа основания и фундаментов, назначения расчетной схемы взаимодействия сооружения с основанием, уточнения требований к предельным деформациям основания фундаментов, необходимо геотехническое прогнозирование влияния возводимых объектов на окружающие сооружения. При проектировании оснований фундаментов следует учитывать наиболее существенные факторы, определяющие напряженно-деформируемое состояние (НДС) грунтового основания: пространственную работу конструкций, геометрическую и физическую нелинейность, анизотропию, пластические и реологические свойства материалов и грунтов, развитие областей пластических деформаций под фундаментом. Несмотря на то что практически все нескальные грунты проявляют свойства деформационной анизотропии в той или иной степени, действующие нормативные документы этого не учитывают, а общепринятые методы прогнозирования осадок [1, 2] фундаментов не позволяют оценить поведение грунтового основания с учетом его реальных свойств.

Ранее авторами был проведен численный эксперимент методом конечных элементов с применением программного пакета ANSYS [3, 4] (с учетом многолетних экспериментальных исследований других авторов [5–10]), в результате которого было проанализировано влияние деформационной анизотропии на НДС грунтового основания, сложенного анизотропными грунтами. Степень деформационной анизотропии оценивалась по данным расширенных стандартных инженерно-геологических изысканий исходя из соотношения модулей деформации грунта в вертикальном E_z и горизонтальном E_x направлениях $k_a = E_z/E_x$. Возможная анизотропия грунта в горизонтальной плоскости не рассматривалась, $E_x = E_y$.

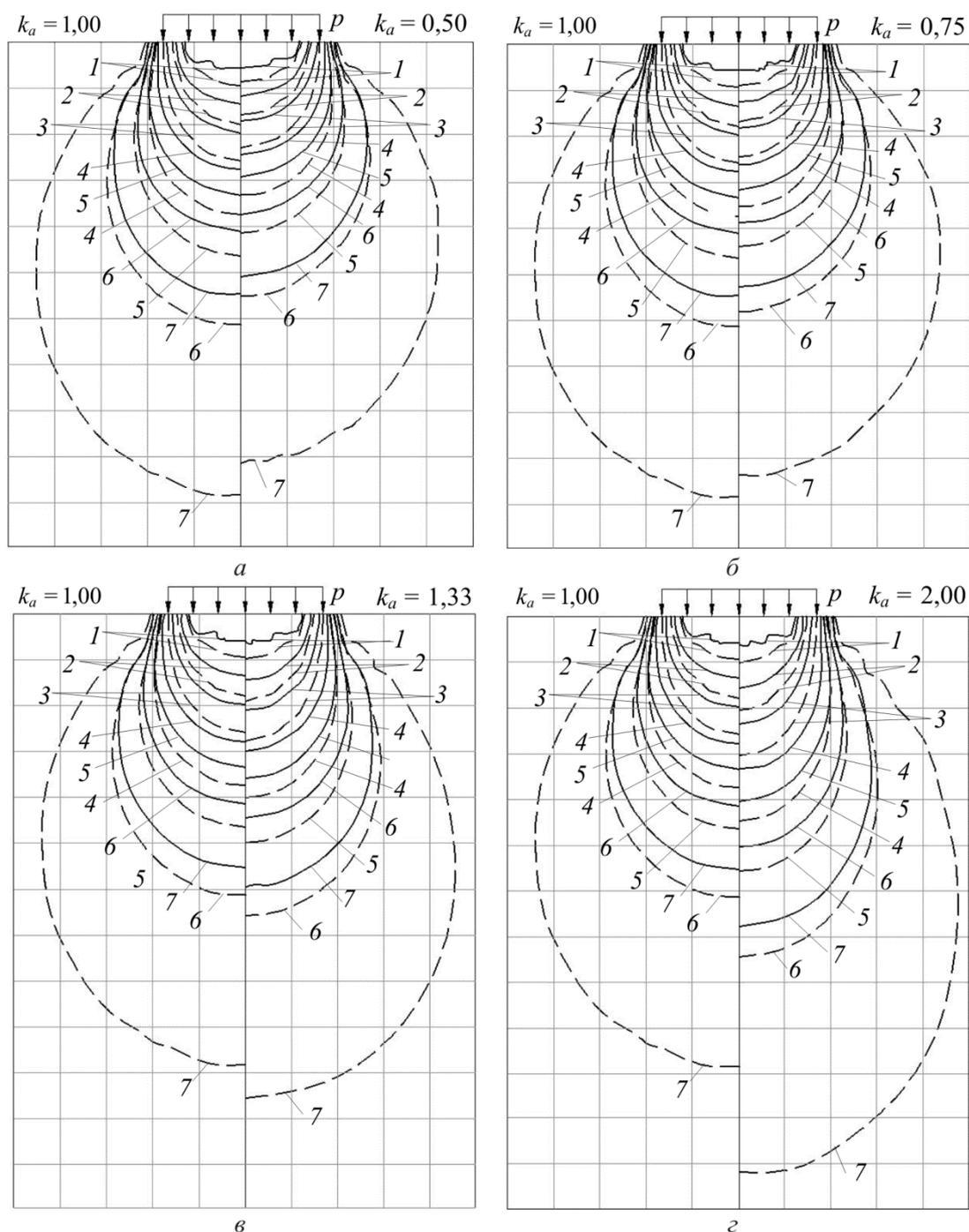


Рис. 1. Распределение дополнительных напряжений (σ_{zp} и σ'_{zp}) под подошвой квадратного (3×3 м, сплошная линия) и прямоугольного ($3 \times 4,2$ м, пунктирная линия) фундаментов в изотропном (слева, $k_a = 1,00$) и анизотропном (справа) грунтах при коэффициенте анизотропии: а – $k_a = 0,50$; б – $k_a = 0,75$; в – $k_a = 1,33$; г – $k_a = 2,00$; 1 – $0,9p$; 2 – $0,8p$; 3 – $0,5p$; 4 – $0,4p$; 5 – $0,35p$; 6 – $0,25p$; 7 – $0,15$
 Fig. 1. Distribution of additional stresses (σ_{zp} and σ'_{zp}) under the sole of a square (3×3 m, solid line) and rectangular (3×4.2 m, dotted line) foundations in isotropic (left, $k_a = 1.00$) and anisotropic (right) soils with an anisotropy coefficient: а – $k_a = 0.50$; б – $k_a = 0.75$; в – $k_a = 1.33$; г – $k_a = 2.00$; 1 – $0.9p$; 2 – $0.8p$; 3 – $0.5p$; 4 – $0.4p$; 5 – $0.35p$; 6 – $0.25p$; 7 – 0.15

В результате проведенных исследований был выполнен анализ трансверсально-изотропных грунтовых оснований с коэффициентами деформационной анизотропии $k_a = 0,50; 0,75; 1,33; 2,0$ для различных видов фундаментов в плане: круглых, квадратных, прямоугольных и ленточных. Получены распределения напряжений по глубине от дополнительной вертикальной нагрузки σ_{zp} (для изотропного грунта) и σ'_{zp} (для анизотропного грунта) (рис. 1).

На основе обработанных данных численного эксперимента получены коэффициенты α' для определения нормальных напряжений от внешней нагрузки в анизотропном грунтовом основании с учетом разной деформируемости грунта в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Коэффициенты α' определены в зависимости от глубины $\xi = 2z/b$ с учетом разбиения сжимаемой толщи основания на расчетные слои толщиной не более $0,4b$. Значения поправочных коэффициентов α' найдены для различных в плане фундаментов с соотношением сторон $\eta = l/b = 1,0; 1,4; 1,8; 3,2; 5$, а также круглых и ленточных фундаментов ($\eta \geq 10$). Промежуточные значения рекомендуется определять интерполяцией.

Значения коэффициентов, рекомендованных для определения вертикальных напряжений от внешней нагрузки, приведены в табл. 1–4.

Таблица 1

Коэффициенты α' для определения вертикальных напряжений в грунтовом основании от внешней нагрузки, учитывающие анизотропные свойства грунта

Table 1

Coefficients α' for the determination of vertical stresses in the soil basement from an external load, taking into account the anisotropic properties of the soil

$\xi = 2z/b$	Поправочный коэффициент α' при коэффициенте анизотропии k_a , равный							
	Для круглых фундаментов				Для прямоугольных фундаментов с соотношением сторон $\eta = l/b = 1$			
	0,50	0,75	1,33	2,00	0,50	0,75	1,33	2,00
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,4	0,848	0,871	0,963	0,971	0,889	0,910	0,974	0,980
0,8	0,660	0,698	0,782	0,797	0,705	0,742	0,822	0,834
1,2	0,456	0,499	0,577	0,641	0,511	0,556	0,632	0,690
1,6	0,312	0,347	0,419	0,486	0,363	0,402	0,477	0,543
2,0	0,227	0,255	0,316	0,377	0,270	0,302	0,369	0,432
2,4	0,168	0,189	0,239	0,292	0,203	0,228	0,285	0,342
2,8	0,126	0,142	0,183	0,228	0,154	0,174	0,221	0,272
3,2	0,100	0,113	0,146	0,184	0,123	0,139	0,179	0,222
3,6	0,081	0,091	0,119	0,151	0,100	0,113	0,146	0,184
4,0	0,066	0,074	0,097	0,125	0,082	0,092	0,121	0,154
4,4	0,055	0,062	0,081	0,105	0,069	0,077	0,101	0,130
4,8	0,047	0,052	0,069	0,090	0,059	0,065	0,086	0,111
5,2	0,040	0,045	0,059	0,077	0,050	0,056	0,074	0,096
5,6	0,035	0,038	0,051	0,067	0,044	0,048	0,064	0,084
6,0	0,031	0,034	0,045	0,059	0,039	0,042	0,056	0,074
6,4	0,027	0,030	0,039	0,052	0,035	0,037	0,050	0,066
6,8	0,025	0,026	0,035	0,047	0,031	0,033	0,044	0,059
7,2	0,022	0,024	0,031	0,042	0,028	0,030	0,039	0,053
7,6	0,020	0,021	0,028	0,038	0,026	0,027	0,036	0,048
8,0	0,019	0,019	0,026	0,035	0,024	0,025	0,032	0,044
8,4	0,017	0,018	0,023	0,032	0,022	0,022	0,029	0,040

Окончание табл. 1

$\xi = 2z/b$	Поправочный коэффициент α' при коэффициенте анизотропии k_a , равный							
	Для круглых фундаментов				Для прямоугольных фундаментов с соотношением сторон $\eta = l/b = 1$			
	0,50	0,75	1,33	2,00	0,50	0,75	1,33	2,00
8,8	0,016	0,016	0,021	0,029	0,020	0,021	0,027	0,037
9,2	0,015	0,015	0,020	0,027	0,019	0,019	0,025	0,034
9,6	0,014	0,014	0,018	0,025	0,017	0,018	0,023	0,032
10,0	0,013	0,013	0,017	0,023	0,016	0,016	0,021	0,030
10,4	0,012	0,012	0,016	0,022	0,015	0,015	0,020	0,028
10,8	0,011	0,011	0,015	0,021	0,014	0,014	0,019	0,026
11,2	0,011	0,010	0,014	0,019	0,013	0,013	0,017	0,025
11,6	0,010	0,010	0,013	0,018	0,013	0,012	0,016	0,023
12,0	0,009	0,009	0,012	0,017	0,012	0,012	0,015	0,022

Таблица 2

Коэффициенты α' для определения вертикальных напряжений в грунтовом основании от внешней нагрузки, учитывающие анизотропные свойства грунта

Table 2

Coefficients α' for the determination of vertical stresses in the soil basement from an external load, taking into account the anisotropic properties of the soil

$\xi = 2z/b$	Поправочный коэффициент α' при коэффициенте анизотропии k_a , равный							
	Для прямоугольных фундаментов с соотношением сторон $\eta = l/b = 1,4$				Для прямоугольных фундаментов с соотношением сторон $\eta = l/b = 1,8$			
	0,50	0,75	1,33	2,00	0,50	0,75	1,33	2,00
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,4	0,912	0,926	0,945	0,981	0,930	0,940	0,956	0,985
0,8	0,770	0,797	0,838	0,865	0,800	0,821	0,855	0,879
1,2	0,598	0,635	0,697	0,742	0,646	0,676	0,728	0,766
1,6	0,448	0,484	0,553	0,609	0,502	0,534	0,594	0,642
2,0	0,344	0,376	0,443	0,500	0,397	0,426	0,487	0,538
2,4	0,264	0,292	0,353	0,409	0,312	0,339	0,398	0,449
2,8	0,205	0,228	0,281	0,334	0,246	0,270	0,324	0,375
3,2	0,165	0,184	0,231	0,279	0,201	0,222	0,270	0,318
3,6	0,135	0,151	0,191	0,234	0,166	0,183	0,227	0,271
4,0	0,112	0,125	0,159	0,198	0,138	0,153	0,192	0,232
4,4	0,094	0,104	0,135	0,169	0,117	0,129	0,163	0,201
4,8	0,080	0,089	0,116	0,147	0,101	0,111	0,141	0,176
5,2	0,069	0,076	0,100	0,128	0,087	0,095	0,122	0,154
5,6	0,061	0,066	0,087	0,112	0,076	0,083	0,107	0,136
6,0	0,054	0,058	0,076	0,099	0,068	0,073	0,095	0,121
6,4	0,048	0,052	0,068	0,089	0,061	0,065	0,084	0,109
6,8	0,043	0,046	0,060	0,079	0,054	0,058	0,075	0,098
7,2	0,039	0,041	0,054	0,072	0,049	0,052	0,068	0,089
7,6	0,036	0,037	0,049	0,065	0,045	0,047	0,061	0,081
8,0	0,033	0,034	0,044	0,060	0,042	0,043	0,056	0,074
8,4	0,030	0,031	0,040	0,055	0,038	0,039	0,051	0,068
8,8	0,028	0,029	0,037	0,051	0,036	0,036	0,047	0,063
9,2	0,026	0,026	0,034	0,047	0,033	0,033	0,043	0,059
9,6	0,024	0,024	0,032	0,044	0,031	0,031	0,040	0,055
10,0	0,023	0,023	0,029	0,041	0,029	0,029	0,037	0,051

Окончание табл. 2

$\xi = 2z/b$	Поправочный коэффициент α' при коэффициенте анизотропии k_a , равный							
	Для прямоугольных фундаментов с соотношением сторон $\eta = l/b = 1,4$				Для прямоугольных фундаментов с соотношением сторон $\eta = l/b = 1,8$			
	0,50	0,75	1,33	2,00	0,50	0,75	1,33	2,00
10,4	0,021	0,021	0,028	0,038	0,027	0,027	0,035	0,048
10,8	0,020	0,020	0,026	0,036	0,025	0,025	0,033	0,046
11,2	0,019	0,018	0,024	0,034	0,024	0,023	0,031	0,043
11,6	0,018	0,017	0,023	0,032	0,022	0,022	0,029	0,041
12,0	0,017	0,016	0,021	0,031	0,021	0,021	0,027	0,039

Таблица 3

Коэффициенты α' для определения вертикальных напряжений в грунтовом основании от внешней нагрузки, учитывающие анизотропные свойства грунта

Table 3

Coefficients α' for the determination of vertical stresses in the soil basement from an external load, taking into account the anisotropic properties of the soil

$\xi = 2z/b$	Поправочный коэффициент α' при коэффициенте анизотропии k_a , равный							
	Для прямоугольных фундаментов с соотношением сторон $\eta = l/b = 2,4$				Для прямоугольных фундаментов с соотношением сторон $\eta = l/b = 3,2$			
	0,50	0,75	1,33	2,00	0,50	0,75	1,33	2,00
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,4	0,932	0,941	0,955	0,988	0,939	0,947	0,960	0,990
0,8	0,817	0,834	0,863	0,884	0,828	0,842	0,869	0,889
1,2	0,681	0,702	0,746	0,780	0,699	0,716	0,755	0,787
1,6	0,549	0,573	0,623	0,664	0,577	0,594	0,638	0,675
2,0	0,447	0,471	0,523	0,567	0,481	0,499	0,543	0,582
2,4	0,362	0,386	0,437	0,482	0,400	0,418	0,462	0,502
2,8	0,294	0,315	0,365	0,410	0,333	0,351	0,394	0,434
3,2	0,244	0,264	0,311	0,354	0,282	0,299	0,341	0,380
3,6	0,204	0,222	0,265	0,308	0,241	0,256	0,296	0,334
4,0	0,172	0,187	0,228	0,268	0,206	0,220	0,258	0,295
4,4	0,147	0,160	0,197	0,235	0,179	0,191	0,226	0,262
4,8	0,127	0,138	0,172	0,208	0,156	0,167	0,200	0,235
5,2	0,111	0,120	0,151	0,184	0,138	0,147	0,178	0,211
5,6	0,098	0,105	0,133	0,164	0,122	0,130	0,158	0,190
6,0	0,087	0,093	0,118	0,148	0,110	0,116	0,142	0,173
6,4	0,078	0,083	0,106	0,134	0,099	0,104	0,128	0,158
6,8	0,071	0,074	0,095	0,121	0,090	0,093	0,116	0,144
7,2	0,064	0,067	0,086	0,110	0,082	0,085	0,106	0,133
7,6	0,059	0,061	0,078	0,101	0,075	0,077	0,097	0,123
8,0	0,054	0,056	0,071	0,093	0,069	0,071	0,089	0,114
8,4	0,050	0,051	0,065	0,086	0,064	0,065	0,082	0,106
8,8	0,046	0,047	0,060	0,080	0,060	0,060	0,076	0,099
9,2	0,043	0,044	0,056	0,075	0,056	0,056	0,070	0,093
9,6	0,040	0,040	0,052	0,070	0,052	0,052	0,066	0,087
10,0	0,038	0,038	0,048	0,066	0,049	0,048	0,061	0,082
10,4	0,035	0,035	0,045	0,062	0,046	0,045	0,057	0,078
10,8	0,033	0,033	0,042	0,059	0,043	0,042	0,054	0,074
11,2	0,031	0,031	0,040	0,055	0,040	0,039	0,051	0,070
11,6	0,029	0,029	0,037	0,053	0,038	0,037	0,048	0,066
12,0	0,028	0,027	0,035	0,050	0,036	0,035	0,045	0,063

Таблица 4

Коэффициенты α' для определения вертикальных напряжений в грунтовом основании от внешней нагрузки, учитывающие анизотропные свойства грунта

Table 4

Coefficients α' for the determination of vertical stresses in the soil basement from an external load, taking into account the anisotropic properties of the soil

$\xi = 2z/b$	Поправочный коэффициент α' при коэффициенте анизотропии k_a , равный							
	Для прямоугольных фундаментов с соотношением сторон $\eta = l/b = 5$				Для ленточных фундаментов с соотношением сторон $\eta = l/b \geq 10$			
	0,50	0,75	1,33	2,00	0,50	0,75	1,33	2,00
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,4	0,940	0,947	0,960	0,990	0,940	0,947	0,960	0,990
0,8	0,832	0,844	0,870	0,890	0,834	0,845	0,870	0,890
1,2	0,708	0,722	0,758	0,789	0,711	0,724	0,759	0,790
1,6	0,594	0,606	0,645	0,680	0,599	0,610	0,647	0,683
2,0	0,505	0,516	0,554	0,591	0,514	0,523	0,559	0,594
2,4	0,431	0,441	0,478	0,514	0,444	0,451	0,484	0,519
2,8	0,369	0,379	0,414	0,449	0,386	0,392	0,423	0,456
3,2	0,322	0,331	0,364	0,398	0,342	0,347	0,376	0,407
3,6	0,282	0,290	0,322	0,355	0,305	0,310	0,337	0,367
4,0	0,248	0,256	0,286	0,318	0,274	0,278	0,303	0,332
4,4	0,220	0,226	0,256	0,287	0,248	0,251	0,275	0,303
4,8	0,196	0,202	0,231	0,261	0,226	0,229	0,252	0,279
5,2	0,176	0,181	0,208	0,238	0,207	0,210	0,232	0,258
5,6	0,159	0,163	0,189	0,218	0,191	0,193	0,214	0,239
6,0	0,144	0,148	0,172	0,201	0,176	0,178	0,198	0,224
6,4	0,132	0,134	0,158	0,186	0,164	0,165	0,185	0,210
6,8	0,121	0,122	0,145	0,172	0,152	0,154	0,173	0,197
7,2	0,111	0,112	0,133	0,160	0,142	0,143	0,162	0,187
7,6	0,103	0,103	0,123	0,150	0,134	0,134	0,153	0,177
8,0	0,095	0,095	0,115	0,141	0,125	0,126	0,144	0,168
8,4	0,088	0,088	0,106	0,132	0,118	0,118	0,136	0,161
8,8	0,082	0,082	0,099	0,125	0,111	0,112	0,129	0,154
9,2	0,077	0,076	0,093	0,118	0,105	0,106	0,123	0,147
9,6	0,072	0,071	0,087	0,112	0,100	0,100	0,117	0,142
10,0	0,067	0,066	0,082	0,106	0,095	0,094	0,112	0,136
10,4	0,063	0,062	0,077	0,101	0,090	0,090	0,107	0,132
10,8	0,060	0,058	0,073	0,097	0,086	0,085	0,102	0,127
11,2	0,056	0,054	0,069	0,092	0,082	0,081	0,098	0,123
11,6	0,053	0,051	0,065	0,088	0,078	0,077	0,094	0,119
12,0	0,050	0,048	0,062	0,085	0,074	0,073	0,090	0,116

Анализ НДС комплексно загруженных оснований позволяет рекомендовать полученные корректирующие коэффициенты α' также при определении вертикальных напряжений в анизотропном грунтовом основании рассчитываемого фундамента с учетом влияния нагрузок на прилегающие площади на основании решения задачи Лява по методу угловых точек.

Вертикальные напряжения на глубине z от подошвы фундамента по вертикали, проходящей через центр рассчитываемого фундамента с учетом влияния соседних фундаментов или нагрузок на прилегающие площади, рекомендуется определять по формуле

$$\sigma_{z, nf} = \sigma_{zp} + \sum_{i=1}^k \sigma_{z, ai}$$

где σ_{zp} – вертикальные напряжения от внешней нагрузки на глубине z анизотропного грунтового основания, определяемые согласно схеме линейно-деформируемого полупространства; $\sigma_{z, ai}$ – вертикальные напряжения от соседнего фундамента (нагрузок); k – число влияющих фундаментов (нагрузок).

Вертикальные напряжения $\sigma_{z, a}$ на глубине z от подошвы фундамента по вертикали, проходящей через произвольную точку (в пределах или за пределами рассматриваемого фундамента с давлением по подошве, равным p), рекомендуется определять алгебраическим суммированием напряжений $\sigma_{z, cj}$ в угловых точках четырех фиктивных фундаментов по формуле

$$\sigma_{z, a} = \sum_{j=1}^4 \sigma_{z, cj}$$

Вертикальные напряжения от внешней нагрузки на глубине z от подошвы фундамента $\sigma_{z, c}$ по вертикали, проходящей через угловую точку фиктивного фундамента, определяют по формуле

$$\sigma_{z, c} = \alpha' p / 4,$$

где α' – поправочный коэффициент для круглых, квадратных, прямоугольных ($l/b = 1,4; 1,8; 2,4; 3,2; 5$) и ленточных фундаментов, учитывающий деформационную анизотропию грунтового основания в зависимости от $k_a = E_z/E_y$ и $\xi = z/b$ и приведенный в табл. 1–4; p – среднее давление под подошвой влияющего фундамента.

Вертикальные напряжения от внешней нагрузки σ_{zp} зависят от размеров, формы и глубины заложения фундамента, распределения давления на грунт по его подошве и анизотропных свойств грунтов основания. Для прямоугольных, круглых и ленточных фундаментов значения σ_{zp} на глубине z от подошвы фундамента по вертикали, проходящей через центр подошвы рассчитываемого фундамента, следует определять по формуле

$$\sigma_{zp} = \alpha' p,$$

где α' – поправочный коэффициент, учитывающий деформационную анизотропию грунтового основания в зависимости от $\xi = 2z/b$ и приведенный в табл. 1–4; p – среднее давление под подошвой рассчитываемого фундамента.

На основе предлагаемого подхода были определены вертикальные напряжения для плитного фундамента размерами в плане $A = 30 \times 30$ м с учетом влияния строящегося рядом высотного здания. Среднее давление под подошвой рассчитываемого фундамента – $p_1 = 378$ кПа, под подошвой фундамента возводимого здания – $p_2 = 380$ кПа. Грунтовые условия площадки характеризуются наличием в активной зоне основания фундамента только одного слоя грунта – супеси пылеватой, твердой, малой степени водонасыщения, с прослоями песка. Грунтовые воды отсутствуют. Удельный вес грунта $\gamma_e = 17,63$ кН/м³, модуль деформации $E = 14,3$ МПа. В результате численных расчетов были дополнительно к реальной анизотропии $k_a = 1,25$ (определенной при инженерно-геологических изысканиях) условно проанализированы грунтовые основания с различной степенью деформационной

анизотропии $k_a = 0,50; 0,75; 1,33$ и $2,00$, а также изотропные грунтовые условия при $k_a = 1,00$. При определении вертикальных напряжений использовались коэффициенты α' , учитывающие деформационную анизотропию и приведенные в табл. 1–4. Толщину расчетных слоев допускается принимать $0,2$ м согласно ранее проведенным исследованиям [11–15].

На рис. 2 показаны результаты расчета вертикальных напряжений от дополнительной нагрузки с учетом влияния соседнего фундамента при различных значениях анизотропии грунтового основания.

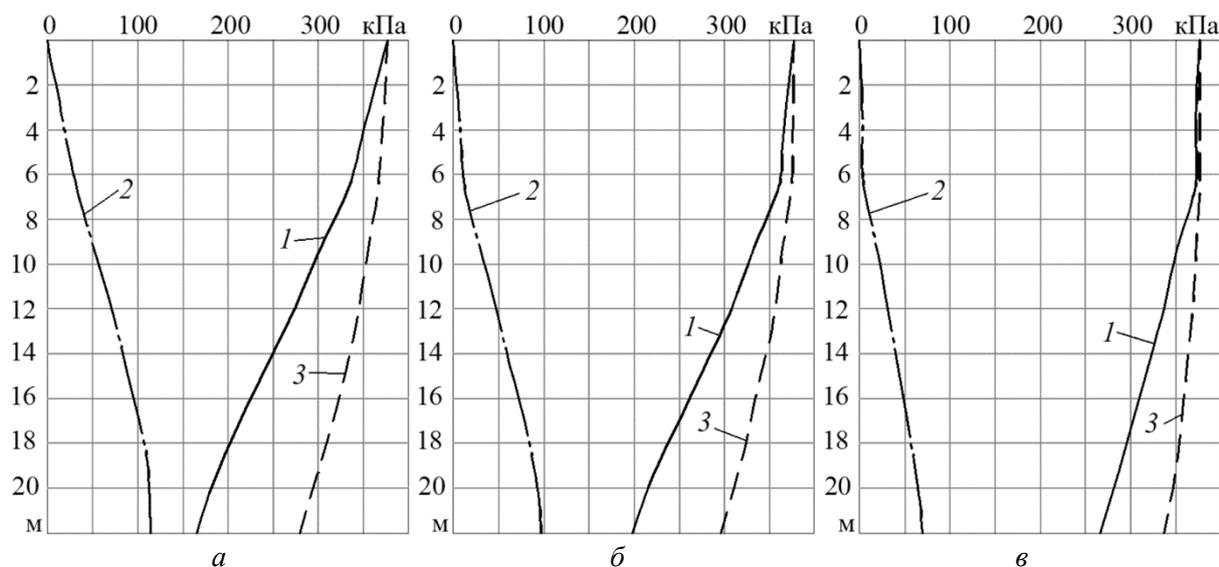


Рис. 2. Распределение вертикальных напряжений в грунтовом основании фундамента 30×30 м с учетом влияния рядом загруженной площади при коэффициенте анизотропии: $a - k_a = 0,50$; $b - k_a = 1,00$ (изотропный грунт); $v - k_a = 2,00$; 1 – распределение напряжений под подошвой рассчитываемого фундамента от собственного веса здания (σ_{zp}); 2 – распределение дополнительных напряжений от нагрузки на прилегающей площади ($\sigma_{zp, a}$); 3 – распределение полных напряжений ($\sigma_{zp, nf} = \sigma_{zp} + \sigma_{zp, a}$)
Fig. 2. Distribution of vertical stresses in the soil basement of foundation 30×30 m Taking into account the effect of a near of loaded areas with anisotropy coefficient: $a - k_a = 0.50$; $b - k_a = 1.00$ (isotropic soil); $v - k_a = 2.00$; 1 – distribution of stresses under the base of the calculated foundation from the building's own weight (σ_{zp}); 2 – distribution of additional stresses from the load on the adjacent area ($\sigma_{zp, a}$); 3 – distribution of total stresses ($\sigma_{zp, nf} = \sigma_{zp} + \sigma_{zp, a}$)

Результаты исследований показывают, что учет анизотропных свойств грунтов позволяет повысить точность прогнозирования осадок фундаментов. Следует обратить внимание, что при коэффициентах деформационной анизотропии $k_a > 1$ реальные осадки превышают расчетные по СП 22.13330.2011 и в отдельных случаях может даже потребоваться увеличение размеров подошвы фундаментов. При $k_a < 1$ неучет анизотропии в расчетах по СП 22.13330.2011 приводит к завышению расчетных осадок, в этом случае правильная оценка НДС анизотропных оснований может позволить получить более экономичное техническое решение фундаментов.

Учет деформационной анизотропии даже при относительно слабовыраженной анизотропии обычных грунтов природного сложения может приводить к уточнению расчетных осадок фундаментов на 10–40 %.

Особенно важное значение учет деформационной анизотропии имеет при проектировании усиления грунтовых оснований с созданием наведенной анизотропии, в том числе при возведении рядом с существующим новых сооружений, или дополнительной загрузке прилегающих к фундаменту площадей.

Библиографический список

1. Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов. – М.: Изд-во АСВ, 2009. – 552 с.
2. Мухелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М.: Наука, 1966. – 708 с.
3. Nuzhdin L.V., Pavlyuk K.V. Analysis of stress-strain state of anisotropic soil basement // Proceeding of the 8th Asian young geotechnical engineers conference. – Astana, 2016. – 277 p.
4. Нуждин Л.В., Павлюк К.В. Влияние деформационной анизотропии грунта на НДС основания фундамента // Инженерно-геотехнические изыскания, проектирование и строительство оснований, фундаментов и подземных сооружений: сб. тр. всерос. науч.-техн. конф. – СПб.: Изд-во С.-Петербург. гос. арх.-строит. ун-та, 2017. – С. 42–49.
5. Нуждин Л.В., Коробова О.А., Нуждин М.Л. Практический метод расчета осадок фундаментов с учетом анизотропии грунтового основания // Фундаменты глубокого заложения и проблемы освоения подземного пространства: сб. тр. всерос. конф. с междунар. участием. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – Ч. 4. – С. 154–162.
6. Коробова О.А., Бирюкова О.А. Методологические подходы к вопросу учета деформационной анизотропии в расчетах грунтовых оснований // Актуальные вопросы строительства: материалы VII Всерос. науч.-техн. конф. – Новосибирск: Изд-во Новосибир. гос. арх.-строит. ун-та (Сибстрин), 2014. – С. 11–16.
7. Коробова О.А. Напряженно-деформированное состояние анизотропных слоев различной мощности под жесткими штампами и фундаментами и его особенности // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1995. – № 5-6. – С. 35–40.
8. Криворотов А.П., Коробова О.А. Влияние мощности анизотропного слоя на его напряженно-деформированное состояние // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1987. – № 12. – С. 104–108.
9. Швецов Г.И., Коробова О.А. Исследование деформационной анизотропии лессовых просадочных грунтов // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1997. – № 9. – С. 93–97.
10. Амбарцумян С.А. Разномодульная теория упругости – М.: Наука, 1982. – 320 с.
11. Evaluation of deformation properties of soils using a wedge dilatometer and improvement of forecast accuracy of buildings settlement / L. Nuzhdin, M. Nuzhdin, X. Kozminykh [et al.] // Challenges and innovations in Geotechnics: Proceeding of ATC7 Workshop, 18ICSMGE. – Paris: Presses des Ponts, 2013. – P. 68–75.
12. Нуждин Л.В., Нуждин М.Л., Козьминих К.В. Підвищення точності прогнозування осідань фундаментів на основі польових досліджень деформованості ґрунтів розкльонивальним дилатометром // Збірник наукових праць: серія – галузеве машинобудування, будівництво. Полтава: Изд-во ПолтНТУ, 2013. – Т. 2, вип. 3 (38). – С. 258–273.
13. Нуждин Л.В., Нуждин М.Л., Козьминих К.В. Методика полевых исследований деформируемости грунтов расклинивающим дилатометром и расчета осадок фундамента по СП 22.13330 // Современные геотехнологии в строительстве и их научно-техническое сопровождение: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. – СПб.: Изд-во С.-Петербург. гос. арх.-строит. ун-та, 2014. – Ч. 2. – С. 122–130.

14. Nuzhdin L., Nuzhdin M., Kozminykh X. The calculation of foundation sediments on the result of field soil test by WD-100 relaxation method // *Geo-Environmental Issues and Sustainable Urban Development*. – Allahabad, 2014.

15. Pazdan parçalayan dilatometrlə çöl şəraitində qruntların tədqiqat üsulu və bünövrələrin çökməsinin hesablanması / İnşaat və Memarlıqda elmi-texniki tərəqqi // *Beynəlxalq elmi-texniki konfransın materialları*. – Azərbaycan, Bakı: Şarq-Qərb, 2014. – P. 182–188.

References

1. Ter-Martirosyan Z.G. *Mexanika gruntov [Soil mechanics]*. Moscow, ASV, 2009, 552 p.
2. Mushelishvili, N.I. *Nekotoryie osnovnyie zadachi matematicheskoy teorii uprugosti [Some basic problems of the mathematical theory of elasticity]*. Moscow, Nauka, 1966, 708 p.
3. Nuzhdin L.V., Pavlyuk K.V. Analysis of stress-strain state of anisotropic soil basement. *Proceeding of the 8th Asian young geotechnical engineers conference*, Astana, 2016, pp. 277–312.
4. Nuzhdin L.V., Pavlyuk K.V. Vliyaniye deformatsionnoj anizotropii grunta na nds osnovaniya fundamenta [Influence of the deformation anisotropy of the soil on the sss of basement of foundation]. *Inzhenerno-geotekhnicheskie izyskaniya, proektirovaniye i stroitel'stvo osnovaniy, fundamentov i podzemnyh sooruzheniy*. Saint Petersburg, Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi arkhitekturo-stroitel'nyi universitet, 2017, pp. 42-49.
5. Nuzhdin L.V., Korobova O.A., Nuzhdin M.L. Prakticheskiy metod rascheta osadok fundamentov s uchetom anizotropii gruntovogo osnovaniya [The practical calculation method of foundation settlements with regard strain anisotropy of the soil basement]. *Fundamenty glubokogo zalozheniya i problemy osvoeniya podzemnogo prostranstva*. Perm, Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2014, pp. 154-162.
6. Korobova O.A., Biryukova O.A. Metodologicheskie podhodyi k voprosu ucheta deformatsionnoy anizotropii v raschetah gruntovyih osnovaniy [Methodological approaches to the problem of taking into account deformation anisotropy in calculations of soil bases]. *Proceedings of the VII All-Russian Scientific and Technical Conference "Topical issues of construction"*. Novosibirsk, Novosibirskii gosudarstvennyi arkhitekturo-stroitel'nyi universitet, 2014, pp. 11-16.
7. Korobova O.A. Napryazhenno - deformirovannoe sostoyaniye anizotropnyih sloev razlichnoy moschnosti pod zhestkimi shtampami i fundamentami i ego osobennosti [Stress-strain state of anisotropic layers of different power under rigid stamp and basements and its features]. *Proceedings of universities. Construction and architecture*, 1995, no. 5-6, pp. 35-40.
8. Krivoroto A.P., Korobova O.A. Vliyaniye moschnosti anizotropnogo sloya na ego napryazhenno - deformirovannoe sostoyaniye [Effect of the power of an anisotropic layer on its stress-strain state]. *Proceedings of universities. Construction and architecture*, 1987, no. 12, pp. 104-108.
9. Shvetsov G.I., Korobova O.A. Issledovaniye deformatsionnoy anizotropii lessovyih prosadochnyih gruntov [Investigation of the deformation anisotropy of loess subsidence soils]. *Proceedings of universities. Construction and architecture*, 1997, no. 9, pp. 93-97.
10. Ambartsumyan S.A. Raznomodul'naya teoriya uprugosti [Multimodulus theory of elasticity]. Moscow, Nauka, 1982, 320 p.
11. Nuzhdin L., Nuzhdin M., Kozminykh X., et al. Evaluation of deformation properties of soils using a wedge dilatometer and improvement of forecast accuracy of buildings settlement. *Proceedings of ATC7 Workshop, 18ICSMGE/ Challenges and innovations in Geotechnics*. Paris, Presses des Ponts, 2013, pp. 68-75.

12. Nuzhdin L.V., Nuzhdin M.L., Kozminykh K.V. Improving the accuracy of prediction of foundations settlement based on field investigations of soil deformability using wedging dilatometer. *Proceedings: sectoral mechanical engineering, construction*. Poltava, PNTU, 2013, ed. 3 (38), vol. 2, pp. 258-273.

13. Nuzhdin L.V., Nuzhdin M.L., Kozminykh K.V. Metodika polevyh issledovaniy deformiruемости gruntov rasklinivayushchim dilatometrom i rascheta osadok fundamenta po SP 22.13330 [Methods of field researches of soil deformability using wedging dilatometer and calculation of foundation settlement according SP 22.13330]. *Sovremennye geotekhnologii v stroitel'stve i ikh nauchno-tekhnicheskoe soprovozhdenie*. Saint Petersburg, Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi arkhitekturno-stroitel'nyi universitet, 2014, part 2, pp.122-130.

14. Nuzhdin L., Nuzhdin M., Kozminykh X. The calculation of foundation sediments on the result of field soil test by WD-100 relaxation method. *Geo-Environmental issues and sustainable urban development*. Allahabad, 2014.

15. Nuzhdin L., Nuzhdin M., Kozminykh K. The calculation of foundation settlements on the result of field soil tests by WD-100 relaxation method. *Proceedings of International Scientific and Technical Conference*. Azerbaijan, Baku: Şarq-Qərb, 2014, pp. 182-188.