

Киричек Ю.А., д-р техн. наук, Трегуб А.В., Тымчишин Е.М.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСКАЕМОГО ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВАНИЯ ФУНДАМЕНТОВ МЕЛКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ ПО ДАННЫМ ЧИСЛЕННОГО УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ

Анотація. Проведено аналіз допустимого тиску на ґрунт за умови розвитку зон пластичних деформацій. Виконано співставлення результатів експериментальних досліджень, чисельних розрахунків з використанням пружно-пластичної моделі деформування ґрунту та рішень за чинними будівельними нормами.

Ключові слова: фундаменти мілкового закладання, зони пластичних деформацій, допустимий тиск на ґрунт.

Аннотация. Выполнен анализ допускаемых давлений на грунт из условия развития зон пластических деформаций. Выполнено сопоставление результатов расчета по действующим нормам с данными экспериментальных исследований и численного расчета с использованием упруго-пластической модели.

Ключевые слова: фундаменты мелкого заложения, зоны пластических деформаций, допускаемое давление на грунт.

Annotation. The analysis of allowable pressure upon a ground from a condition of development of zones of plastic deformations was performed. Comparison of results of calculation by effective standards with experimental results and numerical calculation with use of elastic-plastic model was executed.

Key words: the shallow foundation, zones of the plastic deformations, allowable pressure upon a ground.

Надежность работы фундаментов зависит в наибольшей степени от их размеров, для назначения которых при проектировании необходимо задаваться некой величиной допускаемого давления на грунт. Это должно быть давление, при котором обеспечивается прочность основания, а осадки не должны превышать предельного значения, определяемого в зависимости от вида

конструкций здания. При этом обязательно должен быть заложен определенный запас несущей способности основания с учетом возможных погрешностей исходных данных, возможности увеличения нагрузок, ухудшения характеристик грунта и т.д. При этом необоснованно завышенный запас несущей способности оснований приводит к существенному завышению затрат в строительстве.

Применяемая в настоящее время величина, ограничивающая давление на грунт – расчетное сопротивление основания, обоснована как предельное значение давления, при котором еще возможно использование модели линейно деформируемого полупространства. В настоящее время предложен ряд методов расчета осадок при нелинейной зависимости их от давления [1, 2, 3, 4]. Актуальным остается вопрос определения величины допускаемого давления на грунт. Согласно концепции действующих норм при достижении нагрузкой величины расчетного сопротивления зоны пластических деформаций должны быть развиты на глубину $0,25b$. Однако как указывают О.В. Снежко, Э.Я. Кильвандер [5] и И.Я. Лучковский [6] при этом фактическое развитие зон сдвигов происходит на глубину значительно превышающую указанную. Решения И.В. Яропольского и Н.Н. Маслова [7] позволяют в формулу Н.П. Пузыревского вводить заданные глубины распространения зон сдвигов, названные неустойчивыми зонами. Согласно формуле И.В. Яропольского неустойчивые зоны должны сомкнуться по оси штампа, а формула Н.Н. Маслова предполагает ограничение распространения зон за пределами вертикальных плоскостей, проведенных через краевые точки фундамента. В.Г. Березанцев [7] предлагает считать давление, при котором зоны должны сомкнуться предельным по условию прочности, а давление по формуле Н.Н. Маслова принимать в качестве допускаемого. Результаты экспериментальных исследований М.В. Малышева и С.А. Елизарова [8] показали, что смыкание областей сдвигов на оси штампа, еще не характеризует разрушение основания. В эксперименте смыкание зон произошло при давлении $0,85P_u$, где P_u – предельное сопротивление основания, соответствующее развитию областей пластических деформаций, при которых сформировано упругое ядро под штампом. В.Г. Березанцев [7] отметил, что определение очертания неустойчивых зон с использованием теории линейно-деформируемой среды является неточным. Погрешность в построении зон возрастает с увеличением их размеров. При

исследовании развития таких зон следовало бы использовать упругопластическую модель деформирования основания.

Цель работы – оценка степени развития зон пластических деформаций с использованием данных численного упругопластического решения. Для анализа развития зон пластических деформаций использованы результаты экспериментальных исследований, выполненные Г.А. Скорминым и М.В. Малышевым [9] нагружением штампом диаметром 0,6м песка средней плотности и средней крупности с характеристиками $e=0,62$, $\gamma=16,6\text{кН/м}^3$. К расчету приняты нормативные характеристики $\varphi=36^0$, $c=1\text{ кПа}$

Таблица 1 – Расчетные и экспериментальные данные

Расчетные данные		Экспериментальные данные		
Начальное критическое давление, кПа	Предельное сопротивление $P_{\text{л}}$, кПа	Начало фазы сдвигов, кПа	Предельное давление (разрушение основания), кПа	Выпор грунта при давлении, кПа
9,96	274	75	300	300-350

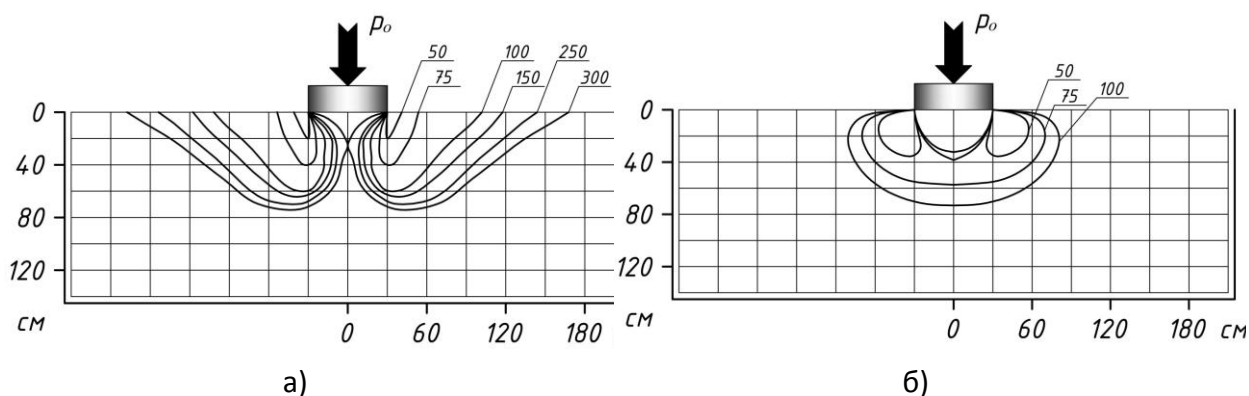


Рисунок 1 – Развитие зон пластических деформаций (цифрами показано давление на основание): а) экспериментальные данные [9]; б) расчет по методу И.Я. Лучковского [6]

Согласно выполненному расчету смыкание зон пластических деформаций по оси штампа произошло при давлении равном 75 кПа. Согласно расчету в Plaxis смыкание происходит на глубине 1,2-1,25b. Ю.Н. Мурзенко [2] также отмечал, что смыкание областей происходило по экспериментальным данным на глубине 1,2b. При большем нагружении эти зоны увеличиваются в ширину и все больше захватывают область массива грунта под фундаментом. Методика И.Я. Лучковского [6] и расчет в Plaxis в данном случае показали большие размеры зон сдвигов по сравнению с экспериментальными данными. Согласно

численному решению после момента смыкания зон сдвигов по оси штампа разрушению основания предшествует ещё достаточный диапазон нагрузок, а потеря прочности основания происходит при полном развитии зон пластических деформаций, когда под штампом сформировано упругое ядро. Таким образом, при использовании численных данных для оценки допустимого давления некоторая погрешность идет в запас прочности.

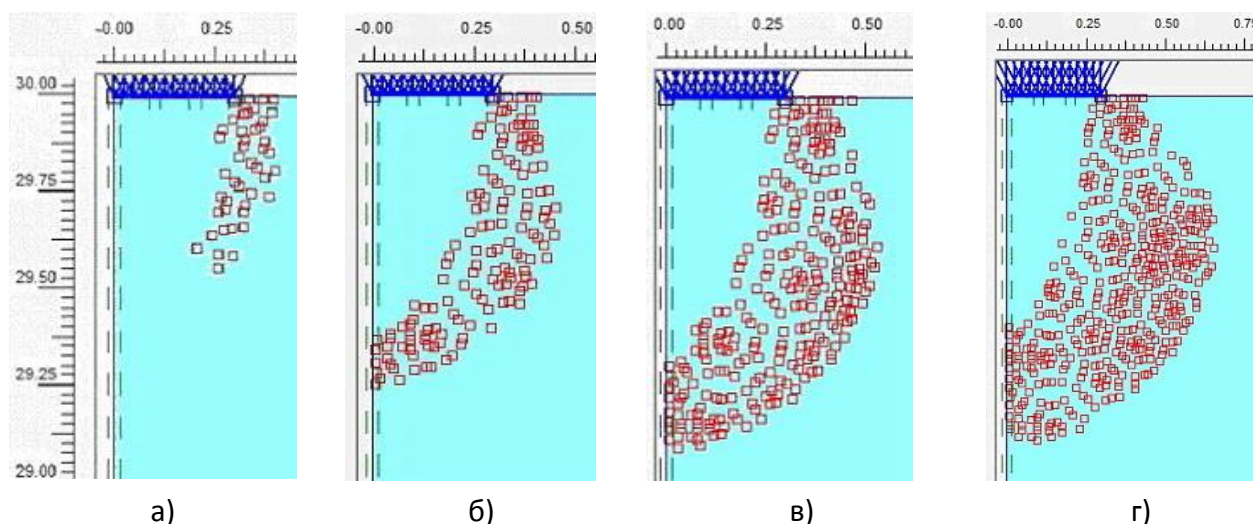


Рисунок 2 – Развитие зон пластических деформаций по результатам упругопластического решения, полученного в программе Plaxis при средних давлениях по подошве штампа: а) 50кПа; б) 75 кПа; в) 100 кПа; г) 150 кПа

Характеристики грунтов для выполнения численного эксперимента приведены в табл. 2. Рассмотрены круглые фундаменты диаметром 2, 4 и 6м и глубиной заложения – 1, 2 и 3м. Результаты расчета приведены в табл. 3.

Таблица 2 – Характеристики грунтов для численных экспериментов

№ п/п	Наименование грунта	e	W	γ , кН/м ³	c, кПа	ϕ , град	E, МПа
1	Песок мелкий плотный маловлажный	0,45	0,08	19,57	6	38	48
2	Песок пылеватый плотный маловлажный	0,45	0,08	19,57	8	36	39
3	Песок мелкий средней плотности маловлажный	0,65	0,08	17,2	2	32	28
4	Песок пылеватый средней плотности маловлажный	0,65	0,08	17,2	4	30	18
5	Супесь пластичная	0,55	0,17	20,07	15	26	24
6	Суглинок полутвердый	0,75	0,23	18,98	25	23	17
7	Суглинок тугопластичный	0,75	0,25	19,29	23	21	14
8	Глина полутвердая	0,75	0,2	19,03	54	19	21
9	Глина тугопластичная	0,75	0,25	18,45	43	16	15

Таблица 3 – Результаты численного решения

Грунт	Диаметр и глубина штампа, м		Расчет по ДБН		Р _{н.кр.} МПа	Допускаемое давление по Маслову, МПа	Давление слияния р _с , МПа	Расчет в Plaxis					
	D	d	R, МПа	P _u , МПа				Давление при S _u , МПа	Глубина зон пластических деформаций в м при давлении равном			Осадка штампа S в см при давлении	
									R	ρ _s	ρ _c	R	ρ _c
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Песок мелкий плотный	2	1	0,420	4,349	0,249	0,507	0,588	1,43	3,7	6,4	2,6	1,60	0,70
		2	0,660	6,885	0,434	0,692	0,773	1,417	4,3	6,2	2,55	2,73	0,81
		3	0,900	9,42	0,619	0,877	0,957	1,46	4,65	6,1	2,2	3,89	0,74
	4	1	0,515	5,665	0,249	0,765	0,927	0,895	6,8	8,75	4,85	3,80	1,84
		2	0,755	8,201	0,434	0,950	1,111	0,924	7,85	8,6	5,55	6,07	2,43
		3	0,995	10,74	0,619	1,135	1,296	0,96	8,55	8,45	5,2	8,41	2,28
	6	1	0,610	6,982	0,249	1,023	1,265	0,694	9,9	10,5	8,0	6,68	3,97
		2	0,850	9,518	0,434	1,208	1,450	0,709	11,0	10,1	7,35	9,84	3,69
		3	1,090	12,05	0,619	1,393	1,634	0,751	11,9	9,95	7,6	13,2	4,23
Песок пылеватый плотный	2	1	0,345	3,388	0,241	0,447	0,519	1,1	3,3	5,65	2,6	1,56	0,93
		2	0,528	5,319	0,402	0,608	0,680	1,133	3,75	5,5	2,55	2,57	1,02
		3	0,712	7,251	0,564	0,769	0,842	1,176	4,0	5,3	2,1	3,67	0,92
	4	1	0,417	4,303	0,241	0,653	0,797	0,718	6,1	7,9	4,95	3,75	2,41
		2	0,600	6,235	0,402	0,814	0,958	0,745	7,0	7,75	4,7	5,83	2,45
		3	0,783	8,167	0,564	0,975	1,120	0,793	7,4	7,45	4,85	7,86	2,73
	6	1	0,488	5,219	0,241	0,859	1,075	0,566	8,8	9,45	7,7	6,38	4,77
		2	0,671	7,151	0,402	1,020	1,237	0,587	9,85	9,25	7,4	9,47	4,67
		3	0,854	9,082	0,564	1,181	1,398	0,623	10,5	9,05	7,4	12,3	5,05

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Песок мелкий средней плотности	2	1	0,217	1,564	0,126	0,241	0,292	0,6	3,3	5,4	2,05	1,58	0,47
		2	0,359	2,611	0,235	0,350	0,401	0,642	3,8	5,1	1,95	2,95	0,56
		3	0,501	3,659	0,344	0,459	0,510	0,7	4,1	4,85	1,95	4,42	0,67
	4	1	0,270	1,985	0,126	0,356	0,458	0,435	6,05	7,45	4,05	3,81	1,47
		2	0,412	3,033	0,235	0,465	0,567	0,465	6,75	7,15	4,2	6,37	1,72
		3	0,554	4,08	0,344	0,574	0,676	0,5	7,45	7,1	4,4	9,22	2,06
	6	1	0,323	2,407	0,126	0,471	0,624	0,369	8,65	9,15	6,5	6,72	3,13
		2	0,465	3,454	0,235	0,580	0,733	0,389	9,7	8,85	6,4	10,5	3,32
		3	0,607	4,502	0,344	0,689	0,842	0,415	10,4	8,45	6,2	14,5	3,42
Песок пылеватый средней плотности	2	1	0,185	1,231	0,128	0,219	0,265	0,413	2,95	4,3	1,95	2,0	0,83
		2	0,294	2,022	0,224	0,315	0,361	0,458	3,25	4,1	1,95	3,48	0,99
		3	0,404	2,814	0,320	0,411	0,457	0,5	3,45	4,0	2,05	5,07	1,67
	4	1	0,225	1,515	0,128	0,310	0,401	0,318	5,4	6,4	4,2	4,69	2,55
		2	0,334	2,306	0,224	0,406	0,497	0,344	6,05	6,15	4,3	7,82	2,97
		3	0,444	3,097	0,320	0,502	0,593	0,376	6,45	5,9	4,3	10,6	3,27
	6	1	0,265	1,798	0,128	0,401	0,538	0,257	7,75	7,7	5,95	8,19	4,61
		2	0,374	2,589	0,224	0,497	0,634	0,279	8,7	7,5	6,35	12,7	5,32
		3	0,483	3,38	0,320	0,593	0,730	0,31	9,1	7,2	6,25	16,9	5,49
Супесь пластичная	2	1	0,241	1,245	0,191	0,257	0,299	0,583	2,4	4,0	2,1	1,61	1,38
		2	0,337	1,857	0,279	0,345	0,387	0,638	2,65	3,85	1,95	2,35	1,35
		3	0,433	2,47	0,366	0,432	0,475	0,692	2,85	3,7	2,1	3,12	1,54
	4	1	0,274	1,436	0,191	0,323	0,407	0,43	4,6	5,9	4,05	3,72	3,20
		2	0,369	2,049	0,279	0,411	0,495	0,465	5,05	5,8	4,1	5,30	3,45
		3	0,465	2,661	0,366	0,498	0,583	0,504	5,35	5,65	4,2	6,73	3,64
	6	1	0,306	1,627	0,191	0,389	0,516	0,356	6,75	7,3	5,95	6,26	5,38
		2	0,402	2,24	0,279	0,476	0,603	0,382	7,45	7,25	6,25	8,73	5,85
		3	0,498	2,852	0,366	0,564	0,691	0,418	7,8	7,0	5,9	10,9	5,81
Суглинок полутвердый	2	1	0,281	1,14	0,225	0,268	0,301	0,556	1,9	3,45	2,1	2,35	2,60
		2	0,36	1,565	0,294	0,337	0,370	0,591	2,35	3,3	2,05	3,03	2,61
		3	0,439	1,99	0,364	0,406	0,440	0,64	2,5	3,25	2,15	3,76	2,87
	4	1	0,306	1,258	0,225	0,311	0,377	0,397	3,65	4,95	4,1	5,21	5,81
		2	0,385	1,683	0,294	0,380	0,446	0,425	4,55	4,9	3,9	6,71	5,67
		3	0,464	2,108	0,364	0,449	0,516	0,45	4,75	4,65	4,2	8,03	6,26
	6	1	0,332	1,376	0,225	0,353	0,453	0,317	5,55	5,15	6,3	8,55	9,49
		2	0,41	1,801	0,294	0,422	0,522	0,342	6,65	5,0	6,0	10,6	9,40
		3	0,489	2,226	0,364	0,492	0,591	0,372	7,05	4,75	5,5	12,9	9,09
Суглинок тугопластичный	2	1	0,236	0,918	0,197	0,230	0,260	0,467	1,7	3,2	1,9	2,30	2,52
		2	0,304	1,267	0,259	0,293	0,322	0,5	2,1	3,15	1,95	2,93	2,68
		3	0,372	1,617	0,322	0,355	0,385	0,548	2,35	3,0	2,1	3,60	3,02
	4	1	0,256	1,007	0,197	0,263	0,323	0,334	3,25	4,65	3,9	5,11	5,80
		2	0,325	1,357	0,259	0,326	0,385	0,365	4,05	4,6	3,75	6,46	5,93
		3	0,393	1,706	0,322	0,388	0,448	0,396	4,5	4,55	3,9	7,89	6,27
	6	1	0,277	1,096	0,197	0,297	0,386	0,267	4,95	4,65	5,7	8,34	9,32
		2	0,346	1,446	0,259	0,359	0,448	0,292	6,15	4,55	5,7	10,5	9,62
		3	0,414	1,796	0,322	0,422	0,511	0,323	6,55	4,3	5,8	12,3	10,1

Конец таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Глина полутвердая	2	1	0,417	1,334	0,351	0,376	0,401	0,787	1,3	3,0	1,95	2,60	3,42
		2	0,479	1,615	0,406	0,431	0,456	0,82	1,55	3,0	2,1	2,92	3,54
		3	0,542	1,896	0,461	0,485	0,511	0,86	1,75	3,0	2,1	3,25	3,76
	4	1	0,435	1,399	0,351	0,400	0,452	0,555	2,6	4,4	4,05	5,48	7,29
		2	0,497	1,68	0,406	0,455	0,506	0,578	3,15	4,4	3,9	6,22	7,26
		3	0,56	1,961	0,461	0,510	0,561	0,607	3,6	4,25	3,9	6,94	7,47
	6	1	0,453	1,464	0,351	0,425	0,502	0,428	4,0	3,6	5,8	8,55	11,0
		2	0,515	1,745	0,406	0,480	0,557	0,45	4,85	3,6	6,0	9,75	11,3
		3	0,578	2,026	0,461	0,535	0,612	0,48	5,35	3,55	5,6	10,8	11,0
Глина тугопластичная	2	1	0,296	0,902	0,259	0,275	0,294	0,563	1,1	2,85	1,85	2,49	3,35
		2	0,345	1,106	0,304	0,319	0,339	0,596	1,35	2,85	1,85	2,78	3,40
		3	0,394	1,31	0,349	0,364	0,384	0,627	1,55	2,8	1,9	3,08	3,58
	4	1	0,309	0,943	0,259	0,290	0,329	0,4	2,35	4,15	3,75	5,30	7,14
		2	0,358	1,147	0,304	0,335	0,374	0,424	2,8	4,0	3,7	5,96	7,16
		3	0,406	1,351	0,349	0,379	0,419	0,45	3,1	4,1	3,75	6,49	7,41
	6	1	0,322	0,983	0,259	0,305	0,364	0,317	3,65	3,5	5,25	8,32	10,5
		2	0,37	1,188	0,304	0,350	0,409	0,34	4,25	3,5	5,45	9,29	10,9
		3	0,419	1,392	0,349	0,394	0,454	0,365	4,7	3,3	5,35	10,1	11,0

Как показали результаты расчетов, допускаемые давления по формуле Н.Н. Маслова отличаются от расчетного сопротивления основания в 0,9-1,75 раза. Наибольшая разница имеет место для плотных грунтов и фундаментов больших размеров, что подтверждено в целом практикой. При давлении на основание равном расчетному сопротивлению глубина развития зон предельного равновесия может значительно превышать предполагаемую нормами - $0,25b$. Соотношение величины предельного сопротивления основания к расчетному сопротивлению находится в пределах от 3,2 до 11,27, в то время как расчет оснований согласно Еврокод [10] рекомендует значение подобного коэффициента в пределах 2 - 4. Это говорит о величине запаса, заложенного в национальных строительных нормах, значительно превышающем в некоторых случаях обоснованные значения. Если говорить о величине деформаций, соответствующих значению расчетного сопротивления, то они, могут быть и значительно ниже допускаемых значений и выше их. Отношение расчетных осадок при давлении, равном расчетному сопротивлению относились к допускаемым осадкам как 0,2-1,61. При этом величина давления, соответствующая значению предельно допускаемой осадке в 0,76-3,4 раза отличается от расчетного сопротивления основания. Осадки растут с увеличением размеров и глубины заложения фундаментов. Причем для

фундаментов шириной 6м и глубиной заложения 2м и более во всех случаях осадки достигали предельных значений. Отношение давления, при котором происходит слияние зон пластических деформаций к величине расчетного сопротивления находится в пределах 0,94 – 2,2. Все это говорит о том, что ограничение расчетным сопротивлением величины действующего давления на грунт, с одной стороны не гарантирует выполнения условий по предельным состояниям, а с другой стороны при этом могут оставаться необоснованно большие резервы несущей способности.

Выводы

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что ограничение допускаемого давления величиной расчетного сопротивления далеко не всегда является рациональным. Более экономичные и надежные решения дает расчет оснований по двум предельным состояниям с расчетом осадок на основе нелинейной модели.

Литература

1. ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти споруд. Мінрегіонбуд України. К: НДІБК. 2009. - 78с.
2. Мурзенко Ю.Н. Расчет оснований зданий и сооружений в упругопластической стадии работы с применением ЭВМ. / Мурзенко Ю.Н.// Л.: Строиздат, Ленингр. отд-ние. 1989. – 135 с.
3. Малышев М.В. Прогноз осадок фундаментов неглубокого заложения с использованием обоих критериев предельных состояний/ Малышев М.В. /Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1996. – №1. – С. 2–4.
4. Трегуб А.В. Развитие методики нелинейного расчета фундаментов мелкого заложения/ Трегуб А.В., Киричек Ю.А./ Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов. Вып. №56. – Дн-вск., ПГАСА, 2010. – С. 535–545.
5. Снежко О.В. О расчетном сопротивлении грунта оснований зданий и сооружений при расчете по деформациям/ Снежко О.В., Кильвандер Э.Я./ «Світ геотехніки», 2005. – №1. - С. 24 – 25.
6. Лучковский И.Я. К вопросу о расчетном сопротивлении грунта основания/ Лучковский И.Я. - Харьков: Коллегиум, 2010. – 48 с.
7. Березанцев В.Г. Расчет оснований сооружений/ Березанцев В.Г. - Ленинград: Изд. лит. по строит., 1970. – 208 с.
8. Елизаров С.А. Критерии несущей способности и различные фазы деформирования основания/ Елизаров С.А., Малышев М.В./ Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1993. – №4. – С. 2–5.
9. Скормин Г.А. Экспериментальное исследование распределения напряжений в песчаном основании под круглым фундаментом в процессе роста нагрузки/ Скормин Г.А., Малышев М.В. / Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1970. – №5. – С. 1–4.
10. EN 1997-1:2003 (E); CEN/TC 250. Eurocode 7 Geotechnical design – Part 1: General rules. Final draft, 2003. – 167 p.