

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ КОЛЬЦЕВЫХ ФУНДАМЕНТОВ НА НАКЛОННОМ ПОДСТИЛАЮЩЕМ СЛОЕ ОСНОВАНИЯ

В. В. Леденёв, Буй Хю Тхо

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов

Рецензент д-р техн. наук, профессор В. П. Ярцев

Ключевые слова: штамп; нагрузка; наклонный подстилающий слой; несущая способность; основание; перемещения; фундамент.

Аннотация: Приведены результаты лабораторных опытов с круглыми металлическими штампами, имеющими вырезы на послойно уплотненном песчаном основании переменной толщины. На штампы действует плоская система сил.

Установлены функциональные зависимости между влияющими параметрами. Показаны оптимальные формы и расположения вырезов в фундаментах, позволяющие регулировать их перемещения.

Введение. В практике строительства часто встречаются территории с наклонными слоями. Это могут быть как естественные отложения, так и насыпные [1, 2]. При возведении зданий и сооружений на таких основаниях иногда возникают недопустимые неравномерные перемещения фундаментов, приводящие к значительным повреждениям и разрушениям конструкций, зданий и сооружений, нарушающих функциональные и эксплуатационные качества [3].

В теоретических работах [2, 4 – 10] получены формулы расчета деформаций основания [4, 10], перемещений фундаментов [5, 6, 8 – 10], учета влияния параметров нагружения [7, 11], в основном, для упругих сред.

Экспериментальные исследования [1 – 3, 11 – 14] направлены на выявление зависимостей разрушающих нагрузок от параметров основания, фундаментов и нагрузки. В них, как правило, исследуется влияние одного или двух факторов, что не позволяет установить функциональные зависимости, кроме того, отмечаются значительные расхождения теоретических и экспериментальных данных.

Леденев Виктор Васильевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструкции зданий и сооружений»; Буй Хю Тхо – магистрант, e-mail: buithocl@yahoo.com.vn, ТамбГТУ, г. Тамбов.

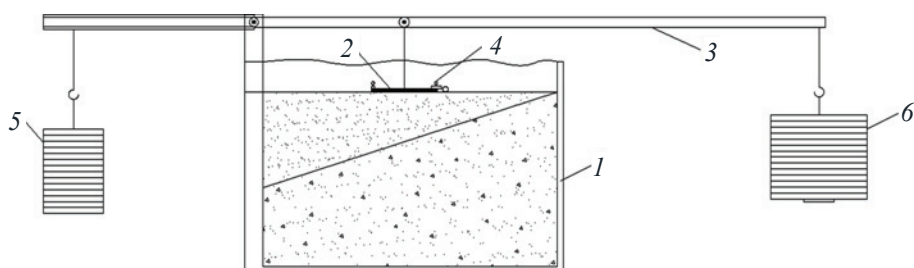


Рис. 1. Схема лабораторной установки:
 1 – лоток; 2 – штамп; 3 – рычаг; 4 – индикаторы;
 5 – противовес; 6 – прикладываемый груз

Цель экспериментов:

- исследование зависимостей несущей способности и перемещений кольцевых штампов на слое грунта переменной сжимаемости от их формы, параметров нагрузки и основания;
- установление оптимальной формы, размеров и расположения внутренних вырезов в штампе.

Методика проведения экспериментов. Опыты проводили в лаборатории кафедры «Конструкции зданий и сооружений» в пространственном стальном лотке размером $170 \times 100 \times 85$ см (рис. 1).

Основанием моделей являлся мелкозернистый песок, послойно уплотненный трамбовкой до плотности $\rho = 1,5 \text{ г/см}^3$ ($\varphi = 30^\circ$, $c = 2 \text{ кПа}$, $E = 7 \text{ МПа}$, где ρ – плотность; φ , c , E – угол внутреннего трения, удельное сцепление и модуль деформации грунта соответственно). Ступенчато возрастающую нагрузку передавали рычагом с десятикратным увеличением (рис. 2).

В качестве моделей фундаментов использовали жесткие (по критерию М. И. Горбунова-Посадова) стальные диски толщиной 10 мм с шероховатой контактной поверхностью (рис. 3).

В опытах изменяли относительный эксцентриситет ($e_0 = e/R$, R – радиус штампа) вертикальной силы и относительное заглубление штампа $\lambda = h/d$, где h – расстояние от подошвы до наклонного слоя, d – диаметр штампа (табл. 1). Угол наклона слоя к горизонтали поверхности равен 18° . В отдельных сериях опытов изменяли угол наклона силы к вертикали δ .

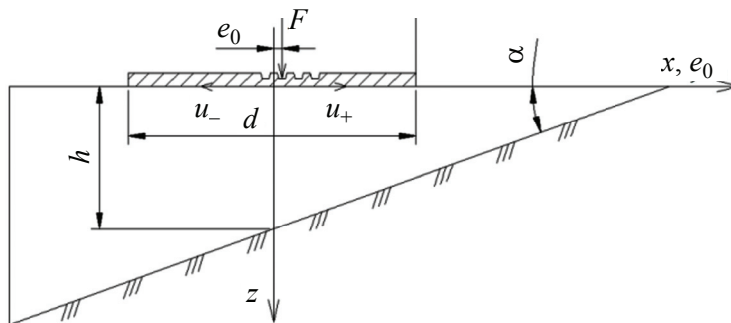


Рис. 2. Направление горизонтальных перемещений штампа под действием внецентрированной вертикальной нагрузки F

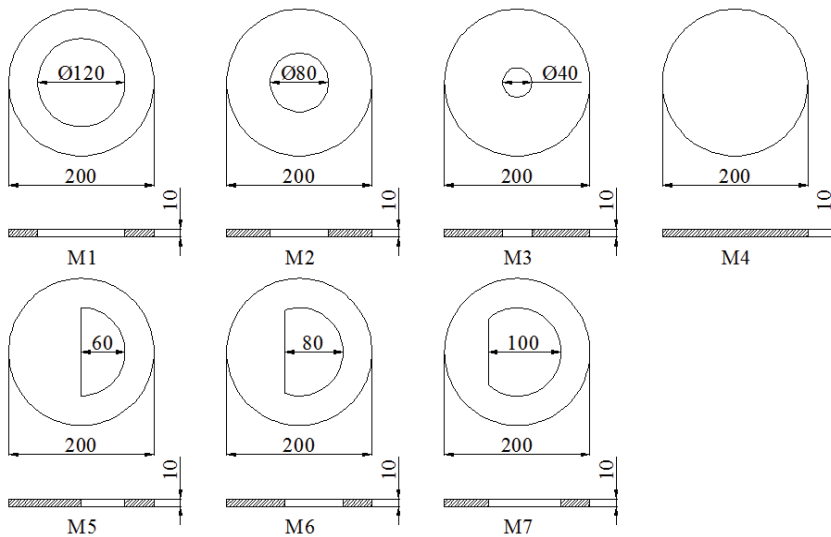


Рис. 3. Формы и размеры штампов

Таблица 1

Перечень опытов со штампами
при $\alpha = 18^\circ$ и $h = 100$ мм

№ опыта	Штамп	e_0	A^* , м ²	№ опыта	Штамп	e_0	A^* , м ²
1	Ш1	-0,3	0,020	26	Ш4	+0,1	0,034
2	Ш1	-0,2	0,020	27	Ш4	+0,2	0,034
3	Ш1	-0,3	0,020	28	Ш4	+0,3	0,034
4	Ш1	0	0,020	29	Ш5	-0,3	0,025
5	Ш1	+0,1	0,020	30	Ш5	-0,2	0,025
6	Ш1	+0,2	0,020	31	Ш5	-0,3	0,025
7	Ш1	+0,3	0,020	32	Ш5	0	0,025
8	Ш2	-0,3	0,026	33	Ш5	+0,1	0,025
9	Ш2	-0,2	0,026	34	Ш5	+0,2	0,025
10	Ш2	-0,3	0,026	35	Ш5	+0,3	0,025
11	Ш2	0	0,026	36	Ш6	-0,3	0,023
12	Ш2	+0,1	0,026	37	Ш6	-0,2	0,023
13	Ш2	+0,2	0,026	38	Ш6	-0,3	0,023
14	Ш2	+0,3	0,026	39	Ш6	0	0,023
15	Ш3	-0,3	0,030	40	Ш6	+0,1	0,023
16	Ш3	-0,2	0,030	41	Ш6	+0,2	0,023
17	Ш3	-0,3	0,030	42	Ш6	+0,3	0,023
18	Ш3	0	0,030	43	Ш7	-0,3	0,021
19	Ш3	+0,1	0,030	44	Ш7	-0,2	0,021
20	Ш3	+0,2	0,030	45	Ш7	-0,3	0,021
21	Ш3	+0,3	0,030	46	Ш7	0	0,021
22	Ш4	-0,3	0,034	47	Ш7	+0,1	0,021
23	Ш4	-0,2	0,034	48	Ш7	+0,2	0,021
24	Ш4	-0,3	0,034	49	Ш7	+0,3	0,021
25	Ш4	0	0,034				

* A – площадь штампа.

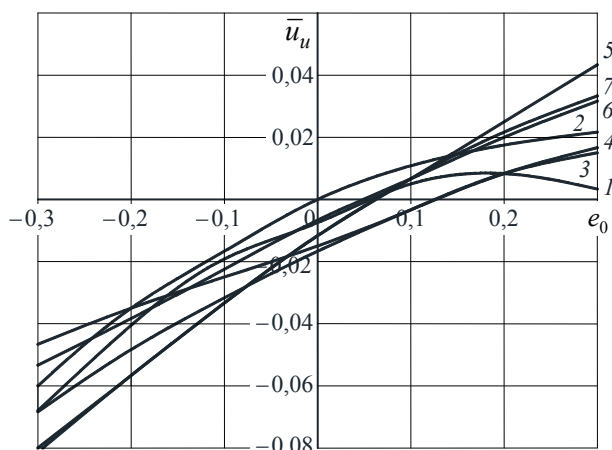


Рис. 4. Графики зависимости \bar{u}_u от e_0 , при $\alpha = 18^\circ$, $h = 100$ мм:
1 – Ш1; 2 – Ш2; 3 – Ш3; 4 – Ш4; 5 – Ш5; 6 – Ш6; 7 – Ш7

Анализ результатов экспериментов. Определяли горизонтальное перемещение u ; его предельное u_u (табл. 2) и относительное \bar{u}_u ($\bar{u}_u = u_u/d$) значения. Направление горизонтальных перемещений для разных штампов оказалось разным (рис. 4).

Функциональные зависимости \bar{u}_u от e_0 :

$$\bar{u}_{u1} = -0,325e_0^2 + 0,1204e_0 - 0,0037;$$

$$\bar{u}_{u2} = -0,2089e_0^2 + 0,1334e_0 - 0,0004;$$

$$\bar{u}_{u3} = -0,125e_0^2 + 0,1407e_0 - 0,0157;$$

$$\bar{u}_{u4} = -0,0083e_0^2 + 0,1064e_0 - 0,0142;$$

$$\bar{u}_{u5} = -0,0655e_0^2 + 0,2043e_0 - 0,0127;$$

$$\bar{u}_{u6} = -0,1315e_0^2 + 0,1934e_0 - 0,0121;$$

$$\bar{u}_{u7} = -0,0363e_0^2 + 0,1459e_0 - 0,0078.$$

Возможно, влияние толщины сжимаемого слоя было более существенным при больших величинах контактного трения между песком и подстилающим слоем.

Таблица 2

Предельные горизонтальные перемещения, u_{ui} , мм

e_0	Штампы						
	Ш1	Ш2	Ш3	Ш4	Ш5	Ш6	Ш7
-0,3	-13,6	-10,1	-12,3	-8,3	-14,0	-14,5	-10,3
-0,2	-8,1	-9,2	-10,8	-7,8	-13,6	-14,0	-8,3
-0,1	-5,0	-4,9	-9,9	-6,8	-7,6	-6,4	-4,8
0,0	0,2	1,2	-0,7	-3,2	-3,8	-3,8	-2,9
0,1	1,6	3,5	1,5	1,7	4,5	4,0	3,2
0,2	0,7	4,0	0,7	1,7	6,2	4,8	4,4
0,3	0,8	3,2	2,5	2,4	6,9	5,6	5,8

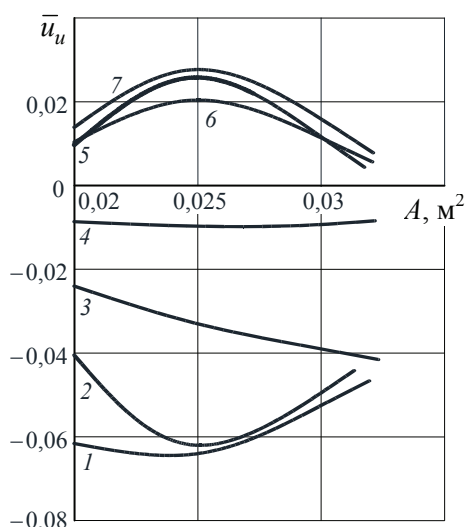


Рис. 5. Графики зависимости \bar{u}_u от площади и формы штампов при $\alpha = 18^\circ$, $h = 100$ мм и различных значениях e_0 :
 1 – -0,3; 2 – -0,2; 3 – -0,1;
 4 – -0; 5 – 0,1; 6 – 0,2; 7 – 0,3

Результаты влияния площади штампа показаны на рис. 5.

Функциональные зависимости \bar{u}_u от площади штампов A :

$$\begin{aligned} \bar{u}_{u1} &= 287,97 A^2 - 13,487 A + 0,0929; \\ \bar{u}_{u2} &= 681,27 A^2 - 34,971 A + 0,3865; \\ \bar{u}_{u3} &= 60,766 A^2 - 4,5304 A + 0,0423; \\ \bar{u}_{u4} &= 30,191 A^2 - 1,5761 A + 0,0108; \\ \bar{u}_{u5} &= -605,26 A^2 + 30,452 A - 0,3572; \\ \bar{u}_{u6} &= -380,62 A^2 + 19,14 A - 0,2202; \\ \bar{u}_{u7} &= -512,41 A^2 + 25,821 A - 0,2976. \end{aligned}$$

Зависимость несущей способности от знака и величины эксцентриситета. В табл. 3 и на рис. 6 приведены предельные значения несущей способности штампов.

Таблица 3

Предельные значения несущей способности p_u , кПа

e_0	Штампы						
	Ш1	Ш2	Ш3	Ш4	Ш5	Ш6	Ш7
-0,3	80,64	68,20	60,00	53,00	72,00	74,29	81,51
-0,2	89,60	78,43	63,00	55,65	82,80	82,11	81,51
-0,3	94,08	75,02	63,00	55,65	75,60	89,93	90,09
0	103,04	78,43	69,00	60,95	79,20	93,84	94,38
0,1	98,56	78,43	66,00	58,30	82,80	86,02	85,80
0,2	94,08	71,61	69,00	60,95	79,20	82,11	81,51
0,3	94,08	75,02	57,00	50,35	79,20	82,11	77,22

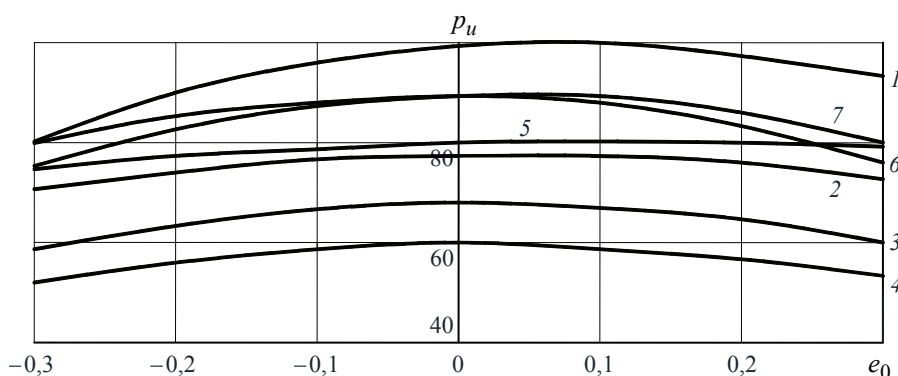


Рис. 6. Графики зависимости предельных значений несущей способности p_u от e_0 при $\alpha = 18^\circ$, $h = 100$ мм:
 1 – Ш1; 2 – Ш2; 3 – Ш3; 4 – Ш4; 5 – Ш5; 6 – Ш6; 7 – Ш7

Функциональные зависимости p_u от e_0 :

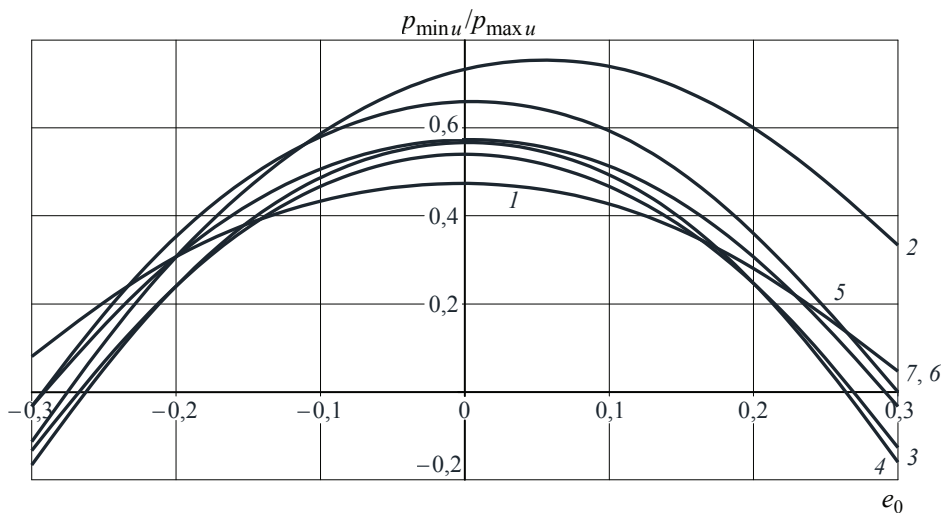
$$\begin{aligned}
 p_{u1} &= -138,67 e_0^2 + 19,2 e_0 + 98,987; \\
 p_{u2} &= -69,012 e_0^2 + 3,6536 e_0 + 77,78; \\
 p_{u3} &= -92,857 e_0^2 + 2,1429 e_0 + 67,571; \\
 p_{u4} &= -82,024 e_0^2 + 1,8929 e_0 + 59,688; \\
 p_{u5} &= -42,857 e_0^2 + 7,7143 e_0 + 80,4; \\
 p_{u6} &= -132,79 e_0^2 - 6,1286 e_0 + 89,886; \\
 p_{u7} &= -144,3 e_0^2 + 6,981 e_0 + 90,116.
 \end{aligned}$$

Соотношения краевых давлений грунта (табл. 4, рис. 7). Рассмотрим зависимости $p_{\min u}/p_{\max u} = f(e_0, \Gamma)$, где Γ – форма штампа.

Таблица 4

**Относительные предельные значения
несущей способности $p_{\min u}/p_{\max u}$**

e_0	Штампы						
	Ш1	Ш2	Ш3	Ш4	Ш5	Ш6	Ш7
-0,3	0,06	-0,02	-0,08	-0,08	0,02	0,04	0,06
-0,2	0,26	0,18	0,13	0,07	0,22	0,23	0,26
-0,3	0,66	0,49	0,45	0,39	0,49	0,53	0,52
0	0,26	0,84	0,71	0,94	0,73	0,81	0,82
0,1	0,49	0,92	0,45	0,39	0,49	0,63	0,52
0,2	0,26	0,39	0,13	0,07	0,22	0,24	0,26
0,3	0,06	0,37	-0,07	-0,07	0,02	0,04	0,06



**Рис. 7. Графики зависимости предельных значений
несущей способности $p_{\min u}/p_{\max u} = f(e_0, \Gamma)$:
1 – Ш1; 2 – Ш2; 3 – Ш3; 4 – Ш4; 5 – Ш5; 6 – Ш6; 7 – Ш7**

Функциональные зависимости $p_{\min u}/p_{\max u}$ от e_0 :

$$p_{\min u}/p_{\max u}(1) = -4,631e_0^2 - 0,0607e_0 + 0,4781;$$

$$p_{\min u}/p_{\max u}(2) = -6,9524e_0^2 + 0,7214e_0 + 0,731;$$

$$p_{\min u}/p_{\max u}(3) = -7,4881e_0^2 + 0,0107e_0 + 0,5452;$$

$$p_{\min u}/p_{\max u}(4) = -8,1548e_0^2 + 0,0107e_0 + 0,5705;$$

$$p_{\min u}/p_{\max u}(5) = -8,1548e_0^2 + 0,0107e_0 + 0,5705;$$

$$p_{\min u}/p_{\max u}(6) = -7,5238e_0^2 + 0,0429e_0 + 0,661;$$

$$p_{\min u}/p_{\max u}(7) = -7,5238e_0^2 + 0,0429e_0 + 0,661.$$

Выводы.

1. Здания, сооружения и отдельные фундаменты на наклонных подстилающих слоях иногда получают недопустимые деформации.

2. Регулируя соотношениями e_0 , δ , λ , α , можно ограничить перемещения допустимыми величинами.

3. При проектировании следует прогнозировать возможные изменения характеристик грунтов по границам наклонных слоев.

4. Получены новые данные о характере взаимодействия круглых, кольцевых фундаментов с разными площадью и формой выреза с грунтовым основанием переменной толщины.

5. Отрыв штампа от основания появляется при $|e_0| > 0,3$.

Список литературы

1. Леденёв, В. В. Экспериментальное исследование оснований заглубленных фундаментов : монография / В. В. Леденёв – Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 1985. – 156 с.

2. Калаев, А. И. Несущая способность оснований : монография / А. И. Калаев. – Л. : Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 183 с.

3. Сорочан, Е. А. Экспериментальное исследование устойчивости оснований прямоугольных фундаментов, нагруженных наклонной нагрузкой / Е. А. Сорочан, А. С. Снарский, Л. Н. Теренецкий // Тр. ВНИИОСП им. Н. М. Герсеева. – 1980. – Вып. 70. – С. 16 – 24.

4. Алейников, С. М. Пространственная деформация поверхности упругого слоя переменной толщины / С. М. Алейников, С. В. Иконин // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1990. – № 5. – С. 21 – 23.

5. Алейников, С. М. Расчет кольцевых фундаментов в сложных инженерно-геологических условиях / С. М. Алейников, А. А. Сергеев // Расчет и проектирование оснований фундаментов в сложных инженерно-геологических условиях / Воронеж. инженер.-строит. ин-т. – Воронеж, 1990. – С. 9 – 12.

6. Вялов, С. С. Напряженно-деформированное состояние неоднородных оснований с наклонными слабыми слоями / С. С. Вялов, А. К. Бугров, А. Н. Цеева // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1989. – № 2. – С. 18 – 21.

7. Мирзабекян, Б. Ю. Несущая способность системы фундамент-основание при эксцентриситете и наклоне нагрузки / Б. Ю. Мирзабекян // Тр. ЦНИИЭПсельстроя. – 1978. – № 11. – С. 37 – 53.

8. Онопа, И. А. Осадки и крены прямоугольного штампа на клиновидном основании / И. А. Онопа, В. Г. Федоровский // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1984. – № 12. – С. 47 – 50.
9. Онопа, И. А. Напряженно-деформированное состояние песчаного основания со сжимаемым слоем переменной толщины / И. А. Онопа, А. С. Канаян // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1987. – № 4. – С. 23 – 25.
10. Федоровский, В. Г. Осадки поверхности клиновидного основания от действия сосредоточенной нагрузки / В. Г. Федоровский, И. А. Онопа // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1985. – № 2. – С. 25 – 28.
11. Лавров, В. Н. Несущая способность ленточного фундамента при действии эксцентричной наклонной нагрузки / В. Н. Лавров, В. Г. Федоровский // Тр. НИИ оснований и подземных сооружений. – 1987. – Вып. 88. – С. 105 – 115.
12. Довнарвич, С. В. Деформирование жесткоподстилаемых слоев грунта при разной толщине слоя / С. В. Довнарвич // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1975. – № 5. – С. 40 – 42.
13. Домбровский, В. Н. О влиянии формы подошвы фундамента на устойчивость песчаного основания / В. Н. Домбровский // Гидротехн. строительство. – 1987. – № 7. – С. 51 – 54.
14. Леденёв, В. В. Перемещение круглого штампа на клиновидном песчаном основании / В. В. Леденёв // Расчет и проектирование оснований и фундаментов в сложных инженерно-геологических условиях / Воронеж. инженер.-строит. ин-т. – Воронеж, 1990. – С. 67 – 77.

References

1. Ledenev V.V. *Ekspperimental'noe issledovanie osnovanii zaglublennykh fundamentov* [Experimental study of the bases of deep foundations], Voronezh: Izdatel'stvo Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta, 1985, 156 p. (In Russ.)
2. Kalaev A.I. *Nesushchaya sposobnost' osnovanii* [The bearing capacity of foundations], Leningrad: Stroiizdat. Leningradskoe otделение, 1990, 183 p. (In Russ.)
3. Sorochan E.A., Snarskii A.S., Terenetskii L.N. [Experimental investigation of the stability of rectangular foundation bases loaded inclined load], *Trudy VNIOSP im. N.M. Gersevanova* [Proceedings of the Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures], 1980, issue 70, pp. 16-24. (In Russ.)
4. Aleinikov S.M., Ikonin S.V. Three-dimensional deformation of the surface of a tapered elastic layer, *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1990, vol. 27, issue 5, pp. 218-222, doi: 10.1007/BF02309522
5. Aleinikov S.M., Sergeev A.A. [Calculation of circular foundations in difficult engineering-geological conditions] *Raschet i proektirovanie osnovanii fundamentov v slozhnykh inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh* [Calculation and design of foundations in difficult engineering-geological conditions], Voronezh, 1990, pp. 9-12. (In Russ.)
6. Vyalov S.S., Bugrov A.K., Tseeva A.N. Stress-strain conditions of nonhomogeneous bases with inclined weak layers, *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1989, vol. 26, issue 2, pp. 67-72, doi: 10.1007/BF02306766
7. Mirzabekyan B.Yu. [The bearing capacity of the foundation of the system, at the base of the load eccentricity and inclination], *Trudy TsNIEPsel'stroya* [Proceedings of the Central Research Institute "Selstroy"], 1978, no. 11, pp. 37-53. (In Russ.)
8. Onopa I.A., Fedorovskii V.G. [Precipitation and the banks of the rectangular stamp on the wedge-shaped base], *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura* [News of higher educational institutions. Construction and architecture], 1984, no. 12, pp. 47-50. (In Russ.)

9. Onopa I.A., Kananyan A.S., Stress-strain state of a sandy bed with a compressible layer of variable thickness, *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1987, volume 24, issue 4, pp. 165-169, doi: 10.1007/BF01716870
10. Fedorovskii V.G. , Onopa I.A. Surface settlements of a wedge-shape bed under a concentrated load, *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1985, vol. 22, issue 2, pp. 79-84, doi: 10.1007/BF01711027
11. Lavrov V.N., Fedorovskii V.G. *Trudy NII osnovanii i podzemnykh sooruzhenii* [Proceedings of the Research Institute of Foundations and Underground Structures], 1987, issue 88, pp. 105-115. (In Russ.)
12. Dovnarovich S.V. Deformation of rigid underlying soil layers for layers of different thickness, *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1975, vol. 2, issue 5, pp. 347-349, doi: 10.1007/BF01706184
13. Dombrovskii V.N. Effect of the shape of the lower surface of a foundation on stability of a sand base, *Hydrotechnical Construction*, 1987, vol. 21, issue 7, pp. 442-446, doi: 10.1007/BF01427278
14. Ledenev V.V. [Moving round stamp on the wedge-shaped sandy foundation] *Raschet i proektirovanie osnovanii fundamentov v slozhnykh inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh* [Calculation and design of foundations in difficult engineering-geological conditions], Voronezh, 1990, pp. 67-77. (In Russ.)
-

Bearing Capacity and Displacement of Circular Foundations on the Inclined Bedding

V. V. Ledenev, Bui Huy Tho

Tambov State Technical University, Tambov

Keywords: bearing capacity; bedding; displacement; foundation; inclined bedding; load; model.

Abstract: We describe the results of laboratory experiments with round metal dies having cutouts on the layered compacted sand bedding of varying thickness. The flat system acts on dies.

We established functional relationships between the influencing parameters. We found optimal shapes and arrangement of cutouts in foundations that allow regulating their displacement.

© В. В. Леденёв, Буй Хю Тхо, 2016