

УДК 624.131

**НЕЛИНЕЙНАЯ МЕХАНИКА
ВЫТЕСНЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ
В ОСНОВАНИЯХ ФУНДАМЕНТОВ**

Борозенец Л.М.

Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия

*Светлой памяти мудрого учителя
Ю.А. Собалевского посвящается*

Проведен анализ экспериментальных исследований, результаты которого положены в основу разработки законченной единой теории аналитической нелинейной механики дисперсных грунтов в основаниях фундаментов. Рассмотрены механическая и математическая модели теории.

The analysis of experimental researches was carried out, the results of which were taken as the basis for developing a complete unified theory of analytical nonlinear mechanics of dispersed grounds at the bases of the foundations. The mechanical and mathematical models of the theory were examined.

Введение. Общая задача нелинейной механики дисперсных грунтов включает: всестороннее изучение, математическое выражение, количественное описание физико-механических процессов, протекающих в дисперсных грунтах под нагрузкой; расчет их напряженно-деформированного состояния; прогноз прочности и устойчивости оснований фундаментов и грунтовых сооружений.

За модель механического поведения дисперсных грунтов принята дискретная среда, расчетная модель которой наделена их физико-механическими особенностями, определенными по результатам экспериментально-теоретических исследований [3].

Метод механики дисперсных грунтов содержит: решение уравнений равновесия краевых и промежуточных предельных состояний грунтов; определение геометрических соотношений зон напряженно-деформированных состояний по предельным равновесиям; выбор физических уравнений состояний при полученных краевых и промежуточных условиях; вид уравнения состояния выбирается для определения расчетной модели математического описания экспериментальных данных [1].

Решение оснований по предельным состояниям включает: расчет несущей способности, прочности и устойчивости грунтов с использованием раздела модели теории их предельного состояния или предельного равновесия; расчет деформаций грунтов или осадок фундаментов с использованием положений раздела модели теории их нелинейного деформирования.

Экспериментально-теоретические исследования. Результаты исследования сжимаемости однородного супесчанистого основания штампа в натурных полевых условиях взяты по литературным данным [3]. Начальное преобразование экспериментального графика 3 нелинейной общей осадки штампа (рис. 1), производится с учетом характера развития дополнительных нелинейных упругих осадок штампа ΔS_n^e по графику 2, принятых за значения фактических нелинейных упругих деформаций супесчанистого основания.

Численные значения ординат нелинейных упругих осадок ΔS_n^e по ступеням нагрузки и суммарных значений нелинейных упругих деформаций S_n^e – приведены в табл. 1 и показаны в виде графика 5 на рис. 1.

Значения вертикальных отрезков ломанного графика 1 рассматриваются как суммарные величины пластически-фрикционных объемных и пластически-фрикционных сдвиговых деформаций основания по ступеням нагрузки штампа. Пропорционально полученным расчетным величинам $\sigma_5^y = 128$ кПа и $\sigma_5^c = 108$ кПа, производится дифференцирование значений вертикальных отрезков

экспериментального ломанного графика 1 по ступеням нагрузки штампа $\Delta S_n^{\gamma-c}$ и их суммарных значений $S_n^{\gamma-c}$ на элементарные составляющие величины осадок, соответственно ΔS_n^γ и ΔS_n^c , S_n^γ и S_n^c , данных в табл. 1 и показанных на рис. 1 в виде элементарных пластически-фрикционных объемных осадок S_n^γ – 6 и пластически-фрикционных сдвиговых осадок S_n^c – 7.

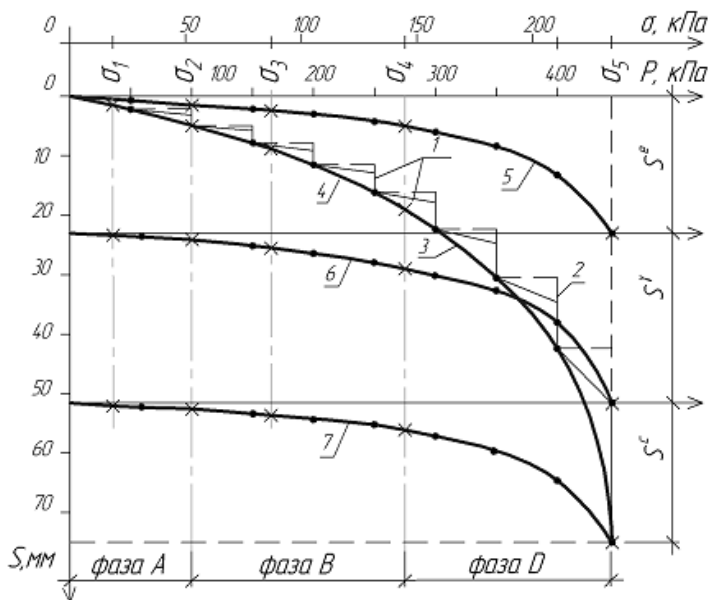


Рис. 1. Графики зависимостей осадок от нагрузок:

- экспериментальные: 1 – ступенчатый пластически-фрикционных осадок;
 2 – ступенчатый суммарный пластически-фрикционных осадок и дополнительных упругих осадок; 3 – нелинейный аппроксимированный по точкам со значениями конечных осадок $S = f(p)$ (—●—);
 расчетные: 4 – общий $S = f(\sigma)$ (—×—);
 экспериментальные и расчетные: 5 – упругих объемных осадок;
 6 – пластически-фрикционных объемных осадок; 7 – пластически-фрикционных сдвиговых осадок

Таблица 1

Экспериментальные поступенчатые осадки штампа

№ СН *	P_n , МПа	Общие		Упругие		Пластически-фрикционные					
				Объемные		Суммарные		Объемные		Сдвиговые	
		S_n	S_k	ΔS_n^e	S_n^e	$\Delta S_n^{\gamma-c}$	$S_n^{\gamma-c}$	ΔS_n^γ	S_n^γ	ΔS_n^c	S_n^c
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,05	1,2	1,8	1,2	1,2	0,6	0,6	0,33	0,33	0,27	0,27
2	0,10	3,0	5,0	1,2	2,4	2,0	2,6	1,08	1,41	0,92	1,19
3	0,15	6,0	8,0	1,0	3,4	2,0	4,6	1,08	2,50	0,92	2,10
4	0,20	8,5	10,5	0,5	3,9	2,0	6,6	1,08	3,58	0,92	3,02
5	0,25	11,0	15,0	0,5	4,4	4,0	10,6	2,17	5,75	1,83	4,85
6	0,30	17,0	20,0	2,0	6,4	3,0	13,6	1,63	7,38	1,37	6,22
7	0,35	23,0	29,0	3,0	9,4	6,0	19,6	3,25	10,5	2,75	8,97
8	0,40	33,5	41,5	4,5	13,9	8,0	27,6	4,34	15,0	3,66	12,60
9	0,45	50,5	75,0	9,0	22,9	24,5	52,1	13,31	28,31	11,19	23,79

* Степень нагрузки

Экспериментальный график нелинейной общей осадки от нагрузки 3 полевого испытания супеси штампом преобразован и представлен в виде трех элементарных графиков 5, 6, 7 составляющих видов осадок, которые используются как исходные данные при теоретических исследованиях.

Решение уравнений состояний предельных равновесий дисперсных грунтов под нагрузкой. Задача взаимодействия жесткого квадратного штампа с супесчаным основанием решалась в осесимметричной пространственной постановке. Математическая модель грунта базируется на открытых пяти состояниях предельных равновесий грунтов при сдвиге по элементарным площадкам в контактах между их частицами. Нелинейность напряженности супесчаного основания по границам состояний предельных

равновесий определяется соответственно значениями пяти углов внутренней связности и трения грунтов:

$$\theta_1 = \varphi; \quad (1)$$

$$\theta_2 = 22,5^\circ + \varphi / 2; \quad (2)$$

$$\theta_3 = 45^\circ; \quad (3)$$

$$\theta_4 = 67,5^\circ - \varphi / 2; \quad (4)$$

$$\theta_5 = 90^\circ - \varphi. \quad (5)$$

Коэффициенты внутренней связности и трения грунта

$$k_i = tg^n \Theta_i, \quad (6)$$

где n – показатель степени, изменяющийся от единицы до двух, в зависимости от вида грунта.

Коэффициент увеличения значений нормального и равного ему сдвигающего усилия, как составляющих от величин значений равнодействующих усилий отпора грунта σ_γ и c

$$k = \sin\varphi + \cos\varphi. \quad (7)$$

Уравнения состояний предельных равновесий для силы упругости скелета грунта σ_γ и силы его удельного сцепления с по боковым поверхностям уплотненного ядра и ствола сваи, соответственно:

$$\sigma_i = \tau_i = [(\sigma_\gamma + c)\Sigma tg^n \theta_i] k; \quad (8)$$

$$\sigma_i = \tau_i = (\sigma_\gamma + c \Sigma tg^n \theta_i) k. \quad (9)$$

Попредельно равновесные пластически-связностные напряжения см. табл. 2.

Сходимость авторского теоретического (рис. 2) и экспериментального исследования формообразования уплотненного ядра по С.Е. Кагановской (рис. 3).

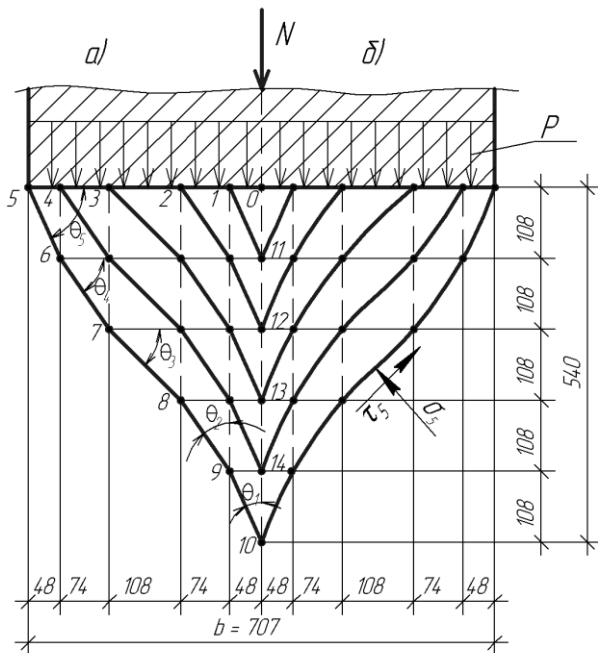


Рис. 2. Расчетная форма уплотнённого ядра грунта в виде пирамидального тангенсоида под квадратной подошвой фундамента в супесчанистом основании

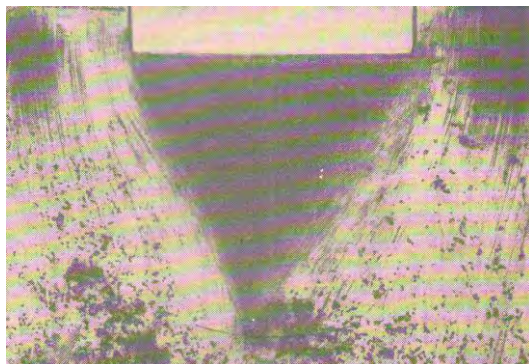


Рис. 3. Подвижный экран с изображением уплотненного ядра в глине по С.Е. Кагановской [2]

Напряжение состояний предельных равновесий

№ СПР *	Пластически-фрикционные				Суммарные	
	Объемные		Сдвиговые			
	$\Delta\sigma_i^\gamma$	σ_i^γ	$\Delta\sigma_i^c$	σ_i^c	$\Delta\sigma_i^{\gamma,c}$	$\sigma_i^{\gamma,c}$
1	10,51	10,51	8,87	8,87	19,38	19,38
2	16,93	27,41	14,30	23,17	31,23	50,61
3	20,33	47,77	17,16	40,33	37,49	88,10
4	30,70	78,47	25,93	66,26	56,63	144,73
5	49,50	127,97	41,79	108,05	91,29	236,02
* Состояние предельного равновесия						

Определение геометрических соотношений зон напряженно-деформированных состояний предельных равновесий дисперсных грунтов под нагрузкой. Расчет геометрических параметров и их соотношений для выбора физических уравнений нелинейно деформированного состояния производится по начальным, промежуточным и конечным краевым предельным напряжениям в основании фундамента.

Радиусы границ зон предельных напряжений, ограниченных полупространством:

$$R_4 = R_5 \sigma_5 / \sigma_4, \quad (10)$$

.....

$$R_0 = R_5 \sigma_5 / \sigma_0. \quad (15)$$

Схема развития зон предельных напряженно-деформированных состояний грунта в основании 3 под фундаментом 1 от уплотненно-го ядра 2 приведена на рис. 4.

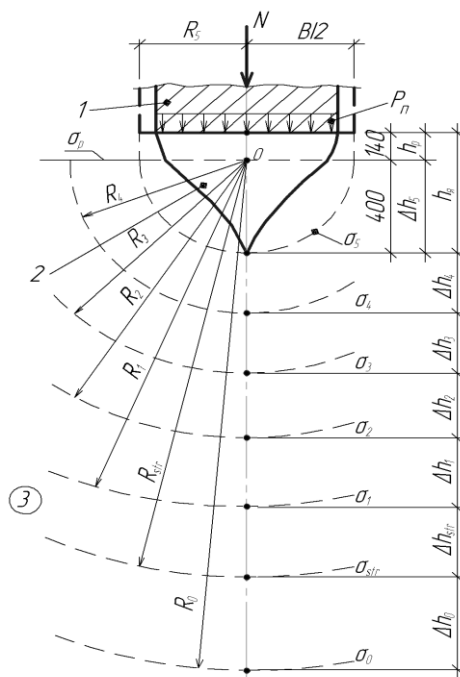


Рис. 4. Схема развития зон предельных напряженно-деформированных состояний грунта:
 1 – под фундаментом; 2 – в объеме уплотненного ядра; 3 – в его основании

Мощность сжимаемой толщи каждого слоя грунта между границами:

$$\Delta h_5 = h_p - h_p; \quad (16)$$

$$\Delta h_5 = R_5; \quad (17)$$

$$\Delta h_4 = R_4 - R_5; \quad (18)$$

.....

$$\Delta h_1 = R_1 - R_2; \quad (21)$$

$$\Delta h_{str} = R_{str} - R_1; \quad (22)$$

$$\Delta h_0 = R_0 - R_{str}. \quad (23)$$

Сжимаемость каждого слоя грунта или физические уравнения состояний:

$$\Delta S_p = [0,5(P_n + \sigma_p)h_p] / E_n^m; \quad (24)$$

$$\Delta S_5 = [0,5(\sigma_p + \sigma_5)\Delta h_5] / E_n^m; \quad (25)$$

$$\Delta S_4 = [0,5(\sigma_5 + \sigma_4)\Delta h_4] / E_n^m; \quad (26)$$

.....

$$\Delta S_1 = [0,5(\sigma_2 + \sigma_1)\Delta h_1] / E_5^0; \quad (29)$$

$$\Delta S_{str} = [0,5(\sigma_1 + \sigma_{str})\Delta h_{str}] / E_n^m; \quad (30)$$

$$\Delta S_0 = [0,5(\sigma_{str} + \sigma_0)\Delta h_0] / E_n^m, \quad (31)$$

где E_n^m – поступенчатые модули нелинейной общей, нелинейной упругой, пластической объемной и пластической сдвиговой деформаций; n – номера ступеней нагрузки; m – обозначения видов деформаций: o – общей, e – упругой, γ – объемной, s – сдвиговой.

Модули нелинейных общих, нелинейных упругих объемных, пластических объемных и пластических сдвиговых деформаций дисперсных грунтов. Поступенчатые модули всех видов нелинейных деформаций определены по значениям экспериментальных осадок S_n^m (см. табл. 1).

$$E_n^m = \Sigma \bar{\sigma}_{n,i} \Delta h_{n,i} / S_n^m, \quad (32)$$

где в числителе находится сумма произведений средних значений расчётных «предельноравновесных» напряжений на значения мощностей слоев грунта, i - номер состояния предельного равновесия.

По значениям модулей нелинейных деформаций определяются «эталонные» коэффициенты пропорциональности относительно модуля общей деформации

$$k_n^m = E_n^m / E, \quad (33)$$

значения которых занесены в табл. 3.

Коэффициенты k_n^m являются физически действительными для любых разновидностей дисперсных грунтов, имеющих собственный модуль деформации E .

Поступенчатые модули нелинейных видов деформаций для любых разновидностей дисперсных грунтов

$$E_n^m = k_n^m E. \quad (34)$$

Таблица 3

Эталонные коэффициенты пропорциональности модулей нелинейных и пластических деформаций грунтов

№ СН*	Значения коэффициентов деформаций			
	нелинейных		пластических	
	общих	упругих	объемных	сдвиговых
	k_n^0	k_n^e	k_n^γ	k_n^c
1	1,48	2,19	7,96	9,75
2	1,39	2,18	3,74	4,47
3	1,99	2,35	3,21	3,74
4	1,72	2,73	2,92	3,46
5	1,58	2,94	2,31	2,71
6	1,66	2,50	2,14	2,57
7	1,35	1,95	1,72	2,07
8	1,17	1,65	1,42	1,64
9	0,82	1,00	0,83	1,00
* – степень нагрузки				

Значения расчетных осадков при предельных равновесиях

$$\Delta S_i^m = \bar{\sigma}_{n,i} \Delta h_{n,i} / E_n^m. \quad (35)$$

Значения поступенчатых нелинейных осадков

$$S_n^m = \Sigma \Delta S_{n,i}^m. \quad (36)$$

Предельная несущая способность грунта основания уплотненно-го ядра в форме пирамидального тангенсоида

$$F_d = \tau_5 A_{\sigma.n.} = N = pA, \quad (37)$$

где τ_5 – предельное касательное напряжение сопротивления связности сдвигу по боковой поверхности пирамидального тангенсоида площадью $A_{\sigma.n.}$, см. рис.1.

Полная предельная осадка фундамента на последней ступени нагрузки

$$S_9^0 = \Sigma \Delta S_{9,i}^0. \quad (38)$$

Построенный по значениям напряжений и деформаций расчетный график зависимости осадки от напряжения $S = f(\sigma)$ совершенно совпадает с экспериментальным графиком зависимости осадки от нагрузки $S = f(p)$, несходимость значений экспериментальных и расчетных осадок составляет около 0,3 %.

Выводы

1. Впервые по результатам экспериментальных и теоретических исследований разработана методика построения элементарных составляющих видов графика нелинейной общей деформации дисперсных грунтов: – графики нелинейной упругой объемной, пластической объемной и пластической сдвиговой деформации.

2. Создана законченная единая теория нелинейного деформирования предельно напряжённых дисперсных грунтов для решения общих задач механики грунтов.

3. Расчетные исследования, основанные на положениях разработанной теории аналитической нелинейной механики грунтов, обладают высокой степенью объективности, сравнимой с экспериментальной.

4. Получена возможность определять предельную несущую способность и нелинейную деформацию дисперсных грунтов в основаниях фундаментов с построением расчетных графиков зависимости осадок от нагрузок, сопоставимых с экспериментальными.

Литература

1. Борозенец, Л.М. Модель теории нелинейного упругого и пластического деформирования дисперсных грунтов в основаниях фундаментов. Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении : материалы Всероссийской науч.-техн. конф. / Л.М. Борозенец. – Новочеркасск : ЮРГТУ (НПИ), 2012. – С. 102–109.

2. Кагановская, С.Е. Исследование устойчивости глинистого основания с помощью экранов / С.Е. Кагановская // ОФМГ. – 1973. – № 3. – С. 29–31.

3. Клейн, Г.К. Основания и фундаменты / Г.К. Клейн, Н.М. Дорошкевич, П.П. Смирнин. – Третье изд-е, перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1967. – 264 с. : ил.