

# Основания и фундаменты, подземные сооружения

УДК 624.131

DOI: 10.14529/build190204

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНО-ЛИНЕЙНОГО ВИДА ГРАФИКА ЗАВИСИМОСТИ ОСАДКИ ОТ НАГРУЗКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БУРОВОЙ СВАИ

*Л.М. Борозенец, Е.А. Ушакова*

*Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия*

Статья посвящена научному обоснованию впервые открытого нелинейно-линейного вида графика зависимости осадки от нагрузки опытной буровой сваи. Показаны теоретические подходы к расчетному определению критических нагрузок по всем пяти зонам состояний предельных равновесий для боковой поверхности ствола и тангенсоида вращения сваи. Представлен расчетный нелинейный график зависимости осадки от нагрузки экспериментальной буровой сваи. Показано теоретическое построение расчетного нелинейно-линейного графика зависимости осадки от нагрузки опытной буровой сваи. Сделаны обобщающие выводы по сущности содержания проведенного исследования.

*Ключевые слова:* теория, эксперимент, грунт, свая, нагрузка, основание, давление, напряжение, сдвиг, деформация, равновесие, зона, осадка, нелинейная и линейная зависимость, тангенсоид вращения.

### Введение

Тема исследования разработана с использованием известных положений теории напряжения нелинейного упругопластическивязкого взаимодействия нагружаемой одиночной сваи с грунтами оснований [1] и модели теории нелинейного деформирования предельно-напряженных зернистых пылевато-глинистых и песчаных грунтов [2]. Показана схема конструкции буровой сваи Б-1 и приведены физико-механические характеристики грунтов основания. Произведено теоретическое построение формы уплотненного ядра грунта в виде тангенсоида вращения. Определены расчетные нагрузки по границам пяти зон состояний предельных равновесий тангенсоида вращения сваи для значений  $\sigma_{1-5}$ . Приведены расчетные критические нагрузки по пяти зонам состояний предельных равновесий боковых поверхностей ствола и тангенсоида вращения сваи при значениях  $\sigma_{3(1-5)}$ .

Выявлено, что экспериментальный нелинейный график зависимости осадки от нагрузки буровой сваи формируется в пределах первой, второй и начальной половине третьей зон состояний предельных равновесий грунта основания фазы А уплотнения тангенсоидом вращения условного массивного фундамента с диаметром  $d_s$ ; начальный экспериментальный линейный график зависимости осадки от нагрузки формируется в пределах конечной половины третьей зоны состояния предельного равновесия грунта основания фазы В допредельного разуплотнения грунта тангенсоидом вращения ствола сваи диаметром  $d_c$ . Отсюда начальный экс-

периментальный линейный график теоретически принимается за начало расчетного линейного в пределах конечной половины третьей, четвертой и пятой зон состояний предельных равновесий грунта основания фазы В допредельного разуплотнения грунта тангенсоидом вращения ствола сваи  $d_c$ .

Методология расчетного исследования включает следующие факторы: обоснование задействованных в работе сваи зон состояния предельных равновесий грунта, расчет несущей способности основания и осадки буровой сваи, расчет сжимаемости грунта в основании подошвы условного массивного фундамента буровой сваи, определение значений нагрузок и деформации фактических экспериментальных зон состояний предельных равновесий.

### 1. Теоретическое исследование и расчетное определение критических нагрузок по пяти зонам состояний предельных равновесий боковых поверхностей ствола и тангенсоида вращения сваи

Разработка методологии расчета указанных факторов проводится с использованием экспериментальных данных, полученных в полевых условиях для буровой сваи Б-1 [2]. На рис. 1 изображена схема буровой сваи Б-1.

Характеристики каждого слоя грунтов-суглинков:

1-й слой:  $h_1 = 1,5$  м;  $c_1 = 34,6$  кПа;  $\varphi_1 = 23^\circ$ ;  
 $e_1 = 0,93$ ;  $\gamma_1 = 17,0$  кН/м<sup>3</sup>;  $\gamma_{d1} = 14,4$  кН/м<sup>3</sup>.

2-й слой:  $h_2 = 1,0$  м;  $c_2 = 27,9$  кПа;  $\varphi_2 = 22^\circ$ ;  
 $e_2 = 0,78$ ;  $\gamma_2 = 18,5$  кН/м<sup>3</sup>;  $\gamma_{d2} = 15,2$  кН/м<sup>3</sup>.  
 3-й слой:  $h_3 = 0,64$  м;  $c_3 = 24,2$  кПа;  
 $\varphi_3 = 21^\circ$ ;  $e_3 = 0,79$ ;  $\gamma_3 = 18,8$  кН/м<sup>3</sup>;  $\gamma_{d3} = 15,3$  кН/м<sup>3</sup>.

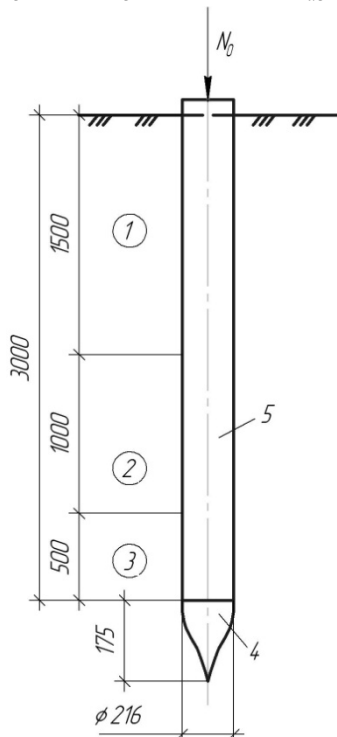


Рис. 1. Схема буровой сваи Б-1: 1, 2, 3 – слои грунтов; 4 – тангенсоид вращения; 5 – свая

Нагрузки на основание сваи: от массы ствола сваи  $N_c = \pi \cdot R^2 l_C \gamma_6 = 2,64$  кН; от массы домкрата  $N_d = 0,5$  кН; внешняя нагрузка  $N_0 = 90$  кН. Общая нагрузка на основание сваи  $N = N_0 + N_c + N_d = 93,14$  кН [1].

В состав буровой сваи 5 включено уплотненное ядро грунта в виде тангенсоида вращения 4 как жесткого грунтового несущего элемента в основании нижнего конца сваи. Геометрические параметры для определения формы и размеров тангенсоида вращения определяются с использованием углов внутренней трения  $\varphi_i$  [1].

Общая площадь боковой поверхности тангенсоида вращения:

$$A_T = \sum A_i = 0,0794 \text{ м}^2,$$

где  $A_i$  – площади боковых поверхностей усеченных конусов.

Расчетное исследование с целью упрощения проводится по средневзвешенным значениям физико-механических характеристик грунтов:  $\bar{c} = 28,862$  кПа;  $\bar{\varphi} = 22^\circ$ ;  $\bar{\gamma}_d = 14,95$  кН/м<sup>3</sup>;  $\bar{\gamma} = 17,8$  кН/м<sup>3</sup> [1].

Средневзвешенные значения углов внутреннего трения грунта пяти зон состояний предель-

ных равновесий:  $\varphi_1 = \varphi = 22^\circ$ ;  
 $\varphi_2 = 22,5^\circ + \varphi / 2 = 33,5^\circ$ ;  $\varphi_3 = 45^\circ$ ;  
 $\varphi_4 = 67,5^\circ - \varphi / 2 = 56,5^\circ$ ;  $\varphi_5 = 90^\circ - \varphi = 68^\circ$  [1].

Коэффициенты углов внутреннего трения грунта [1]:  $k_1 = \text{tg} \varphi_1 = 0,4040$ ;  $k_2 = \text{tg} \varphi_2 = 0,6619$ ;  
 $k_3 = \text{tg} \varphi_3 = 1,0$ ;  $k_4 = \text{tg} \varphi_4 = 1,5108$ ;  
 $k_5 = \text{tg} \varphi_5 = 2,475$ .

Суммарное значение коэффициентов [1]:  $\sum \text{tg} \varphi_{1-5} = \text{tg} \varphi_1 + \dots + \text{tg} \varphi_5 = 6,0517$ .

Коэффициент тотальности напряжений сжатия:  $k = \sin \varphi + \cos \varphi = 1,3018$  [1].

Максимальные напряжения зон состояний предельных равновесий упругости и упругопластичности [1]:

$$\sigma_{str} = \sigma_d \cos \varphi = 13,86 \text{ кПа}; \quad (1)$$

$$\sigma_0 = \sigma_d - \sigma_{str} = 1,07 \text{ кПа}; \quad (2)$$

$$\sigma_1 = (\sigma_d + c) \text{tg} \varphi_1 k = 23,04 \text{ кПа}; \quad (3)$$

$$\sigma_2 = (\sigma_d + c) \text{tg} \varphi_2 k = 37,75 \text{ кПа}; \quad (4)$$

$$\sigma_3 = (\sigma_d + c) \text{tg} \varphi_3 k = 57,03 \text{ кПа}; \quad (5)$$

$$\sigma_4 = (\sigma_d + c) \text{tg} \varphi_4 k = 86,16 \text{ кПа}; \quad (6)$$

$$\sigma_5 = (\sigma_d + c) \text{tg} \varphi_5 k = 141,15 \text{ кПа}. \quad (7)$$

Последовательно суммарные значения напряжений по зонам упругости и упругопластичности [1]:

$$\sum \sigma_{0-0} = 0 + \sigma_0 = 1,07 \text{ кПа};$$

$$\sum \sigma_{0-str} = \sum \sigma_{0-0} + \sigma_{str} = 14,93 \text{ кПа};$$

$$\sum \sigma_{0-1} = \sum \tau_{0-1} = 0 + \sigma_1 = 23,04 \text{ кПа};$$

$$\sum \sigma_{0-2} = \sum \tau_{0-2} = \sigma_{0-1} + \sigma_2 = 60,79 \text{ кПа};$$

$$\sum \sigma_{0-3} = \sum \tau_{0-3} = \sigma_{0-2} + \sigma_3 = 117,82 \text{ кПа};$$

$$\sum \sigma_{0-4} = \sum \tau_{0-4} = \sigma_{0-3} + \sigma_4 = 203,98 \text{ кПа};$$

$$\sum \sigma_{0-5} = \sum \tau_{0-5} = \sigma_{0-4} + \sigma_5 = 345,13 \text{ кПа}.$$

Радиус пятой зоны состояния предельного равновесия [1]:

$$R_5 = \sqrt{2A_c / \pi} = 153 \text{ мм}, \quad (8)$$

где  $A_c$  – площадь поперечного сечения ствола сваи.

По полученным значениям максимальных напряжений пяти зон состояний предельных равновесий, структурной прочности и начальной упругости рассчитываются радиусы их границ [1]:

$$R_4 = R_5 \sigma_{0-5} / \sigma_{0-4} = 0,259 \text{ м}; \quad (9)$$

$$R_3 = R_5 \sigma_{0-5} / \sigma_{0-3} = 0,448 \text{ м}; \quad (10)$$

$$R_2 = R_5 \sigma_{0-5} / \sigma_{0-2} = 0,868 \text{ м}; \quad (11)$$

$$R_1 = R_5 \sigma_{0-5} / \sigma_{0-1} = 2,291 \text{ м}; \quad (12)$$

$$R_{str} = R_5 \sigma_{0-5} / \sigma_{0-str} = 3,536 \text{ м}; \quad (13)$$

$$R_0 = R_5 \sigma_{0-5} / \sigma_{0-0} = 49,416 \text{ м}. \quad (14)$$

Мощность сжимаемой толщи каждого слоя грунта между границами зон [1]:

$$\Delta h_5 = R = 0,153 \text{ м};$$

$$\Delta h_4 = R_4 - R_5 = 0,106 \text{ м}; \quad (15)$$

## Основания и фундаменты, подземные сооружения

$$\Delta h_3 = R_3 - R_4 = 0,189 \text{ м}; \quad (16)$$

$$\Delta h_2 = R_2 - R_3 = 0,420 \text{ м}; \quad (17)$$

$$\Delta h_1 = R_1 - R_2 = 1,423 \text{ м}; \quad (18)$$

$$\Delta h_{str} = R_{str} - R_1 = 1,245 \text{ м}; \quad (19)$$

$$\Delta h_0 = R_0 - R_{str} = 45,879 \text{ м}. \quad (20)$$

Схемы формирования зон состояний предельных равновесий вокруг тангенсоида вращения и ствола сваи (рис. 2 и 3) [1].

Нагрузка по границам зон состояний предельных равновесий тангенсоида вращения [1]:

$$P_1 = A_T \Sigma \sigma_{0-1} = 1,82 \text{ кН}; \quad (21)$$

$$P_2 = A_T \Sigma \sigma_{0-2} = 4,80 \text{ кН}; \quad (22)$$

$$P_3 = A_T \Sigma \sigma_{0-3} = 9,31 \text{ кН}; \quad (23)$$

$$P_4 = A_T \Sigma \sigma_{0-4} = 16,12 \text{ кН}; \quad (24)$$

$$P_5 = A_T \Sigma \sigma_{0-5} = 27,26 \text{ кН}. \quad (25)$$

Согласно теоретическим результатам исследований в процессе формирования тангенсоида вращения из-под него восходящим потоком грунт последовательно по зонам выпирается вверх вдоль ствола сваи под напряжениями давления  $\sigma_{1n}$  – максимального главного нормального сжатия, действующего параллельно стволу сваи, и  $\sigma_{3n}$  – минимального главного напряжения сжатия, направленного ортогонально к боковой поверхности

ствола сваи, обжимающего его и формирующего равного по величине касательного напряжения  $\tau_{3n}$ , удерживающего сваю от погружения [1].

Минимальные главные напряжения сжатия и касательные напряжения сопротивления сдвигу пяти зон состояний предельных равновесий грунта [1]:

$$\sigma_{3,1} = \tau_{3,1} = (\sigma_d + c) \operatorname{tg} \varphi_1 k_3 = 6,64 \text{ кПа}; \quad (26)$$

$$\sigma_{3,2} = \tau_{3,2} = (\sigma_d + c) \operatorname{tg} \varphi_2 k_3 = 10,86 \text{ кПа}; \quad (27)$$

$$\sigma_{3,3} = \tau_{3,3} = (\sigma_d + c) \operatorname{tg} \varphi_3 k_3 = 16,41 \text{ кПа}; \quad (28)$$

$$\sigma_{3,4} = \tau_{3,4} = (\sigma_d + c) \operatorname{tg} \varphi_4 k_3 = 24,79 \text{ кПа}; \quad (29)$$

$$\sigma_{3,5} = \tau_{3,5} = (\sigma_d + c) \operatorname{tg} \varphi_5 k_3 = 40,62 \text{ кПа}, \quad (30)$$

где  $k_3 = \sin \varphi$  – составная часть коэффициента то- тальности.

Последовательно суммарные значения напряжений по зонам [1]:

$$\Sigma \sigma_{3(0-1)} = \Sigma \tau_{3(0-1)} = 0 + \sigma_{3,1} = 6,64 \text{ кПа};$$

$$\Sigma \sigma_{3(0-3)} = \Sigma \tau_{3(0-3)} = \sigma_{3(0-2)} + \sigma_{3,3} = 33,91 \text{ кПа};$$

$$\Sigma \sigma_{3(0-2)} = \Sigma \tau_{3(0-2)} = \sigma_{3(0-1)} + \sigma_{3,2} = 17,5 \text{ кПа};$$

$$\Sigma \sigma_{3(0-4)} = \Sigma \tau_{3(0-4)} = \sigma_{3(0-3)} + \sigma_{3,4} = 58,7 \text{ кПа};$$

$$\Sigma \sigma_{3(0-5)} = \Sigma \tau_{3(0-5)} = \sigma_{3(0-4)} + \sigma_{3,5} = 99,3 \text{ кПа}.$$

Длина схода напряжений по боковой поверхности к оголовку сваи [1]:

$$l_2 = (R_2 - R_3) \operatorname{ctg} \varphi_2 = 0,450 \text{ м}; \quad (31)$$

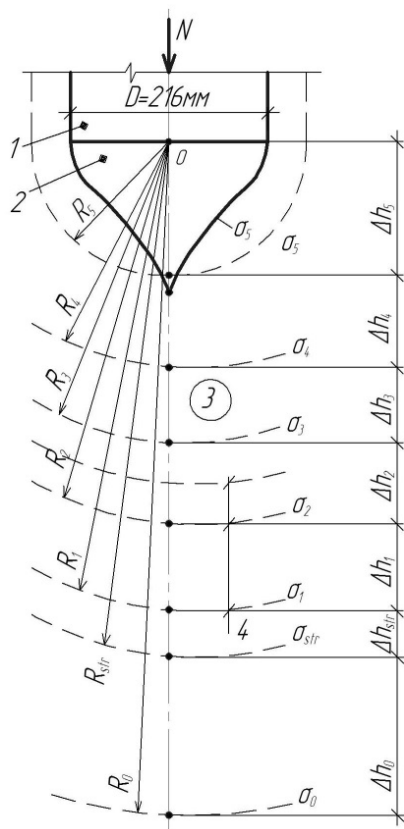


Рис. 2. Схема развития зон предельных напряженно-деформированных состояний под тангенсоидом вращения нижнего конца сваи Б-1: 1 – свая; 2 – тангенсоид вращения; 3 – его основание; 4 – задействованные зоны

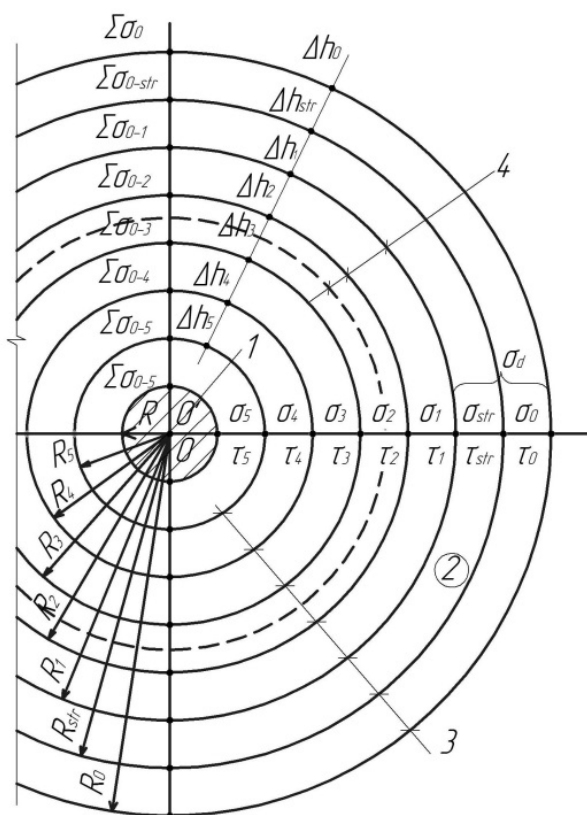


Рис. 3. Схема зон состояний предельных равновесий грунта вокруг ствола сваи: 1 – свая; 2 – грунт напряженное основание сваи; 3 – границы зон; 4 – задействованные зоны

$$l_3 = (R_3 - R_4) \operatorname{ctg} \varphi_3 = 0,133 \text{ м}; \quad (32)$$

$$l_4 = (R_4 - R_5) \operatorname{ctg} \varphi_4 = 0,113 \text{ м}; \quad (33)$$

$$l_5 = R_5 \operatorname{tg} \varphi_5 = 0,267 \text{ м}. \quad (34)$$

Общая длина схода напряжений  $l_0 = \Sigma l_{2...5} = 0,963 \text{ м}$ .

По полученным суммарным значениям напряжений пяти зон состояний предельных равновесий определяются критические нагрузки на буровую сваю:

– первое состояние предельного равновесия грунта

$$P_1 = P_{1c} + P_{1T} = 14,04 \text{ кН}, \quad (35)$$

– второе состояние предельного равновесия грунта

$$P_{1-2} = P_{2c} + P_{2T} + P_1 = 37,66 \text{ кН}, \quad (36)$$

– третье состояние предельного равновесия грунта

$$P_{1-3} = P_{3c} + P_{3T} + P_{1-2} = 66,68 \text{ кН}; \quad (37)$$

– четвертое состояние предельного равновесия грунта

$$P_{1-4} = P_{4c} + P_{4T} + P_{1-3} = 108,48 \text{ кН}; \quad (38)$$

– пятое состояние предельного равновесия грунта

$$P_{1-5} = P_{5c} + P_{5m} + P_{1-4} = 171,82 \text{ кН}. \quad (39)$$

Результаты расчета сведены в табл. 1.

Таблица 1

Нагрузки  $P_n$

№ СДР	1	2	3	4	5
$P_n$ , кН	14,04	37,66	66,68	108,48	171,82

Несущая способность основания сваи по пяти зонам состояний предельных равновесий с учетом предварительного напряжения грунта от взаимодействия со сваем по боковой поверхности ствола:

$$F_{dc1} = F_{d1} + F_{db} = 46,34 \text{ кН},$$

где  $F_{d1} = 14,04 \text{ кН}$ ;

$$F_{db} = A_c \sigma_b = 32,3 \text{ кН}; \quad (40)$$

$$F_{dc2} = F_{d2} + F_{db} = 69,96 \text{ кН}; \quad (41)$$

$$F_{dc3} = F_{d3} + F_{db} = 98,98 \text{ кН}, \quad (42)$$

$$F_{dc4} = F_{d4} + F_{db} = 140,78 \text{ кН}; \quad (43)$$

$$F_{dc5} = F_{d5} + F_{db} = 204,1 \text{ кН}. \quad (44)$$

Результаты расчета показаны в табл. 2.

Таблица 2

Нагрузки  $P_n$  и осадки  $S_n$

№ СДР	1	2	3	4	5
$P_n$ , кН	46,34	69,96	98,98	140,78	204,10
$S_n$ , мм	1,0	3,5	12,7	18,2	69,3

## 2. Экспериментальный и расчетный нелинейные графики зависимости осадки от нагрузки буровой сваи

Экспериментальный нелинейный и частично линейный график зависимости осадки от нагрузки 1 испытания буровой сваи Б-1 в полевых условиях построен на рис. 4.

По результатам теоретических и расчетных исследований на рис. 4 показан расчетный нели-

нейный и частично линейный график зависимости осадки от нагрузки 2.

## 3. Расчетный нелинейно-линейный график зависимости осадки от нагрузки экспериментальной буровой сваи

Несущая способность основания сваи по пяти зонам состояний предельных равновесий с учетом предварительного напряжения грунта от взаимодействия со сваем по боковой поверхности ствола и при полном тангенсоиде вращения ствола сваи показана в табл. 3.

Таблица 3

Напряжения  $\sigma_n$ , нагрузки  $P_n$  и осадки  $S_n$

№ СДР	1	2	3	4	5
$\sigma_n$ , кПа	23,0	60,8	117,8	204,0	345,1
$P_n$ , кН	46,34	69,98	98,98	140,78	204,1
$S_n$ , мм	1,24	2,16	12,7	32,8	62,5

Модуль нелинейной общей деформации  $E_1^0$  определяется по результатам полевого испытания (см. рис. 4), буровой сваи Б-1 при нагрузке на тангенсоид вращения  $P_1 = 60,0 \text{ кН}$  и стабилизированной осадке  $S_1 = 1,6 \text{ мм}$  для диаметра условного массивного фундамента  $d_y = 0,794 \text{ м}$ , коэффициент Пуассона для суглинка  $\nu = 0,37$ .

$$E_1^0 = (1 - \nu^2) P_1 / d S_1 = 40,78 \text{ МПа}. \quad (45)$$

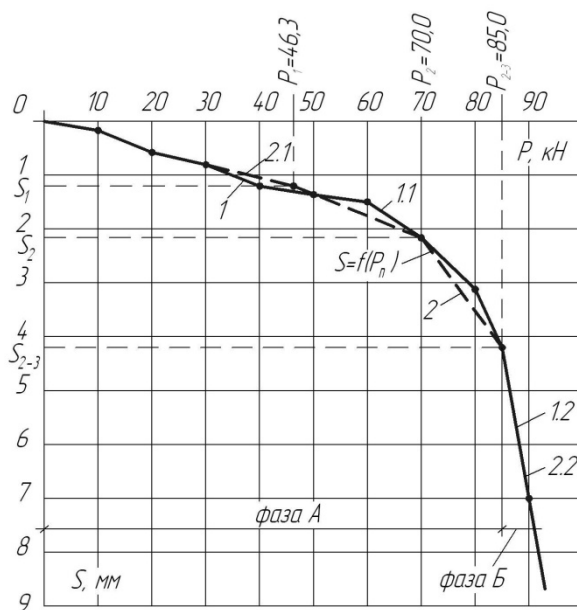


Рис. 4. Графики зависимости осадки от нагрузки  $S = f(P_n)$ : 1 – экспериментальный; 1.1 – экспериментальный нелинейный; 1.2 – экспериментальный линейный; 2 – расчетный; 2.1 – расчетный нелинейный; 2.2 – расчетный линейный

Эталонные попредельно-равновесные коэффициенты пропорциональности модулей нелинейной общей деформации грунта:  $k_1^0 = 1,393$ ;  $k_2^0 = 1,205$ ;  $k_3^0 = 0,725$  – показаны в табл. 4.

# Основания и фундаменты, подземные сооружения

Таблица 4  
Эталонные попредельно-равновесные коэффициенты пропорциональности модулей нелинейной и линейной деформации грунта

Нелинейная деформация грунта			Линейная деформация грунта			
№ СДР	1	2	3.1	3.2	4	5
$k_n^0$	1,393	1,205	0,725	1,073	0,6027	0,446

Модуль общей деформации грунта:

$$E = E_1^0 / k_1^0 = 29,27 \text{ МПа.} \quad (46)$$

Модули нелинейной общей деформации грунта по зональным нагрузкам:

$$E_2^0 = k_2^0 E = 35,27 \text{ МПа;} \quad (47)$$

$$E_3^0 = k_3^0 E = 22,00 \text{ МПа.} \quad (48)$$

Конечная сжимаемость грунта по границам каждой зоны:

$$S_1 = (1 - \nu^2) P_1 / d_y E_1^0 = 0,00124 \text{ м} = 1,24 \text{ мм;} \quad (49)$$

$$S_2 = (1 - \nu^2) P_2 / d_y E_2^0 = 0,00216 \text{ м} = 2,16 \text{ мм;} \quad (50)$$

$$S_{3.1} = (1 - \nu^2) P_{3.1} / d_y E_{3.1}^0 = 0,0042 \text{ м} = 4,2 \text{ мм.} \quad (51)$$

Схема формирования зон состояний предельных равновесий 1...5 по боковой поверхности полного тангенсоида вращения 1 ствола сваи от нагрузки  $N$  на сваю 2 и зон состояний предельных равновесий 1...5, образуемых давлением восходящего потока выпираемого из-под тангенсоида вращения грунта по боковой поверхности ствола буровой сваи, изображена на рис. 5.

Модули нелинейной общей деформации грунта по третьей, четвертой и пятой зонам состояний предельных равновесий грунта:

$$E_{3.2}^0 = 34,40 \text{ МПа; } E_4^0 = 17,64 \text{ МПа; } E_5^0 = 13,05 \text{ МПа.}$$

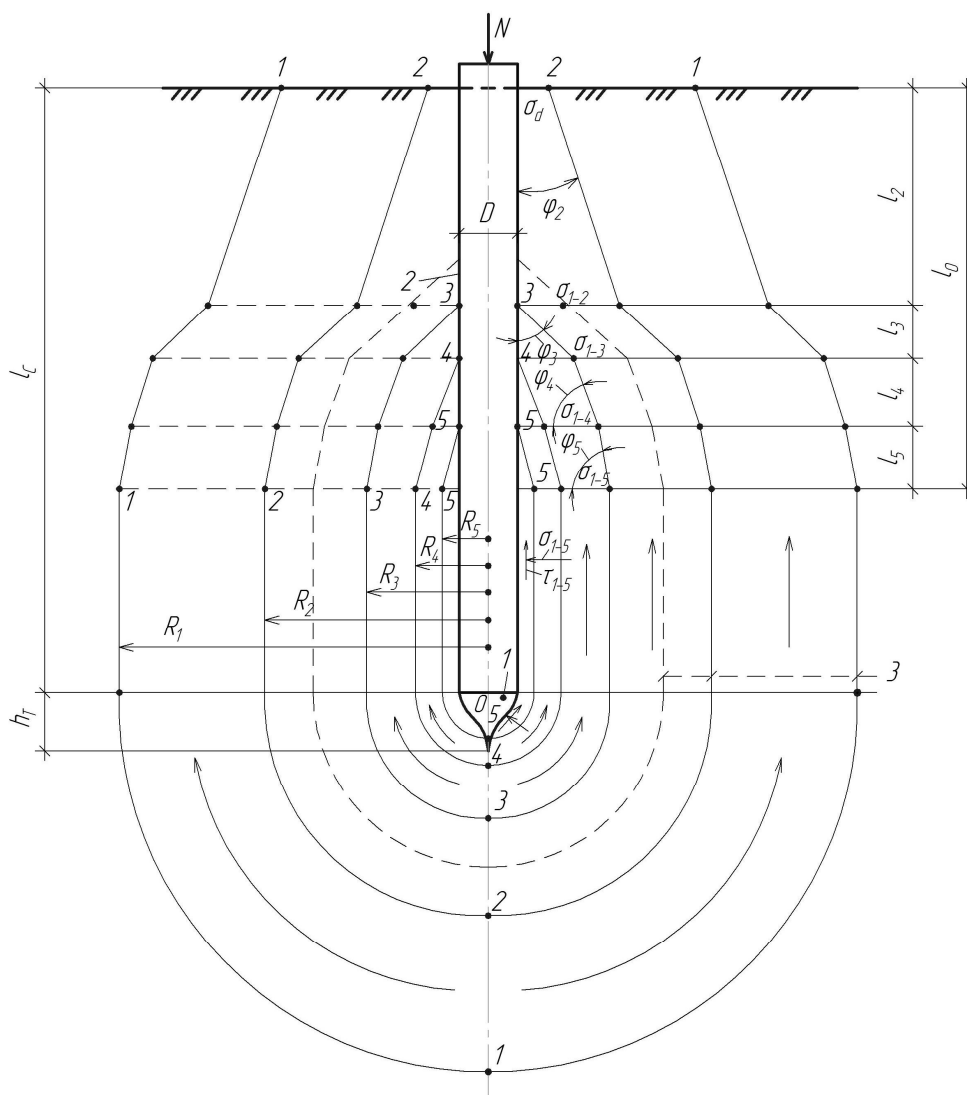


Рис. 5. Схема формирования зон состояний предельных равновесий 1...5 по боковой поверхности полного тангенсоида вращения 1 от нагрузки  $N$  на сваю 2 и зон состояний предельных равновесий 1...5, образуемых давлением восходящего потока выпираемого грунта из-под тангенсоида вращения по боковой поверхности ствола буровой сваи; 3 – зоны, задействованные в эксперименте

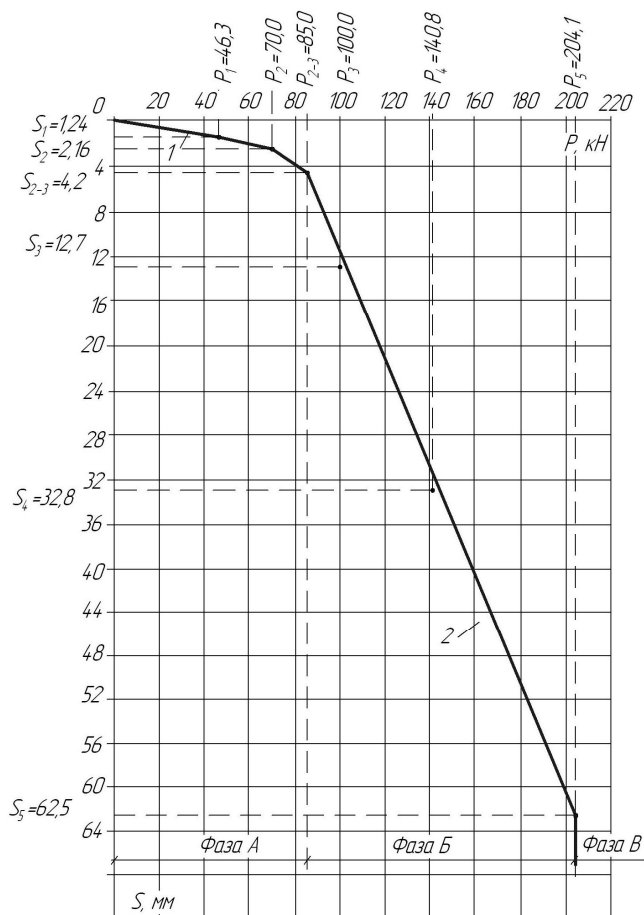


Рис. 6. Расчетный график нелинейно-линейной зависимости осадки от нагрузки  $S = f(P_n)$ : 1 – нелинейный; 2 – линейный

Конечная сжимаемость грунта по границам третьей, четвертой и пятой зон состояний предельных равновесий грунта:

$$S_{3,2} = (1 - \nu^2)P_3 / d_c E_{3,2}^0 = 0,0127 \text{ м} = 12,7 \text{ мм}; \quad (52)$$

$$S_4 = (1 - \nu^2)P_4 / d_c E_4^0 = 0,0328 \text{ м} = 32,8 \text{ мм}; \quad (53)$$

$$S_5 = (1 - \nu^2)P_5 / d_c E_5^0 = 0,0625 \text{ м} = 62,5 \text{ мм}. \quad (54)$$

По результатам расчетов, показанных в табл. 3, построен нелинейно-линейный график зависимости осадки от нагрузки  $S = f(P_n)$  (рис. 6).

### Выводы

1. Предложена геотехника теоретического построения расчетного нелинейно-линейного графика зависимости осадки от нагрузки  $S = f(P_n)$ .

2. Экспериментально и теоретически обоснован начальный нелинейный график зависимости осадки от нагрузки, включающий первую, вторую и первую половину третьей зон состояний предельных равновесий, ограниченный пределом фазы уплотнения грунта А, формируемой под подошвой диаметром  $d_y$  условного массивного фундамента.

3. Обоснован также последующий линейный график зависимости осадки от нагрузки, вклю-

чающий вторую половину третьей, четвертую и пятую зоны состояний предельных равновесий, ограниченный допредельной фазой разуплотнения грунта Б, формируемой тангенсоидом вращения с основанием, равным диаметру  $d_c$  ствола сваи.

4. Разработана методология расчетного определения критических нагрузок пяти зон состояний предельных равновесий для боковой поверхности полного тангенсоида вращения.

5. Создана методология расчетного исследования критических нагрузок пяти зон состояний предельных равновесий для боковой поверхности ствола сваи от минимальных главных напряжений его обжатия.

6. Показано теоретическое построение расчетного нелинейно-линейного графика зависимости осадки от нагрузки опытной буровой сваи с использованием эталонных коэффициентов пропорциональности модулей нелинейной и линейной деформации грунта ее основания, а также модулей нелинейной и линейной общей его деформации.

7. Получена возможность использования расчетных графиков зависимости осадки от нагрузки вместо экспериментальных с равнозначной достоверностью.

### Литература

1. Борозенец, Л.М. Теория напряжения нелинейного упругопластическивязкого взаимодействия нагружаемой одиночной сваи с грунтами основания / Л.М. Борозенец // Вестник ЮУрГУ.

Серия «Строительство и архитектура». – 2017. – Т. 17, № 3. – С. 27–34.

2. Борозенец, Л.М. Геотехника фундаментостроения и грунтоустойчивости: моногр. / Л.М. Борозенец. – Тольятти: ТГУ, 2015. – 588 с.

**Борозенец Леонид Михайлович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленное и гражданское строительство», Архитектурно-строительный институт, Тольяттинский государственный университет (Тольятти), tsp@tltsu.ru

**Ушакова Екатерина Андреевна**, инженер кафедры «Промышленное и гражданское строительство», Архитектурно-строительный институт, Тольяттинский государственный университет (Тольятти), miss.sunshine.lady777@yandex.ru

Поступила в редакцию 5 февраля 2019 г.

---

DOI: 10.14529/build190204

## THEORETICAL JUSTIFICATION OF NONLINEAR-AND-LINEAR DEPENDENCE GRAPH OF SETTLING ON THE LOAD OF AN EXPERIMENTAL BORED PILE

L.M. Borozenetz, tsp@tltsu.ru

E.A. Ushakova, miss.sunshine.lady777@yandex.ru

Togliatti State University, Togliatti, Russian Federation

The article regards a scientific justification of firstly-discovered nonlinear-and-linear dependence graph of settling on the load of an experimental bored pile. Theoretical approaches to calculable determination of critical loads by all five state zones of limit equilibriums for the side surface of the shaft and the tangent curve of the pile's rotation are presented. A calculated nonlinear graph of dependence of settling on the load of the experimental bored pile is given. Theoretical construction of a calculated nonlinear-and-linear graph of dependence of settling on the load of the experimental bored pile is shown. Conclusions on the essence of the content of the conducted research are made.

*Keywords: theory, experiment, soil, pile, load, base, pressure, stress, shear, deformation, equilibrium, zone, setting, nonlinear and linear dependence, tangent curve of rotation.*

### References

1. Borozenets L.M. [Theory of stress of nonlinear elastoplastic viscous interaction of a single pile loaded with soils]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction and Architecture*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 27–34. (in Russ.).

2. Borozenets L.M. *Geotekhnika fundamentostroeniya i gruntoustoychivosti: Monografiya* [Geotechnics of Foundation Engineering and Soil Stability: Monograph]. Tol'yatti, TGU Publ., 2015. 588 p.

Received 5 February 2019

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Борозенец, Л.М. Теоретическое обоснование нелинейно-линейного вида графика зависимости осадки от нагрузки экспериментальной буровой сваи / Л.М. Борозенец, Е.А. Ушакова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 22–28. DOI: 10.14529/build190204

### FOR CITATION

Borozenetz L.M., Ushakova E.A. Theoretical Justification of Nonlinear- and -Linear Dependence Graph of Settling on the Load of an Experimental Bored Pile. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2019, vol. 19, no. 2, pp. 22–28. (in Russ.). DOI: 10.14529/build190204