

УДК 624.152.5 + 624.131

**Л.М. Борозенец, Е.А. Будыльская**

Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия

**ГЕОТЕХНИКА УСТРОЙСТВА ВИСЯЧЕЙ КОНСТРУКТИВНО-  
ГРУНТОВОЙ БУРОНАБИВНОЙ ОПОРЫ-ФУНДАМЕНТА  
ГЛУБОКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ**

В статье представлены результаты комплексного обзорного экспериментально-расчетного и теоретического исследования геотехники проектирования, строительства и эксплуатации одиночных висячих трубчато-грунтовых буронабивных опор глубокого заложения. Разработка связана с проблемой глубокого освоения подземного пространства и отсутствием достоверных методов расчета несущей способности и деформируемости оснований таких опор. Исследование проводится новыми методами аналитической нелинейной механики грунтов. Результатом разработки является достижение высокой достоверности расчета, сопоставимой с экспериментальной действительностью.

**Ключевые слова:** геотехника, грунт, основание, скважина, буронабивная опора, заполнитель, напряжение, деформация, несущая способность, осадка. В настоящее время проблема энергоэффективности является одной из приоритетных.

**L.M. Borosenetz , E.A. Budylskaya**

Togliatti State University, Togliatti, Russian Federation

**THE GEOTECHNICS OF THE AGGREGATE OF SUSPENSION  
CONSTRUCTION-SUBSURFACE BORE-CAST-IN-PILE FOOTING-  
BASEMENT STRUCTURE OF DEEP FOUNDATION**

This article presents the results of complex general experimental-calculating and theoretical research in geotechnics of engineering, building, exploitation of the individual banded tubular-subsurface cast-in-plice footings of deep foundation. The development is connected with the problem of profound exploration underground space and with the absence of reliable methods of calculating bearing capacity and basement deformability of that kind of footing. The result of the development is the achievement of high reliable calculation that can be compared with experimental reality.

**Keywords:** geotechnics, subsurface, basement, hole, bore-cast-in-plice footing, aggregate, stress, deformation, bearing capacity, settlement.

**Введение**

При залегании прочных грунтов на значительной глубине, когда устройство фундаментов в открытых котлованах затруднительным, экономически нецелесообразно, а применение свай не обеспечивает

необходимой несущей способности, обращаются к устройству буровых опор-фундаментов глубокого заложения. Буровые опоры представляют собой бетонные столбы, возводимые путем укладки бетонной смеси в предварительно пробуренные скважины. Укладка бетонной смеси производится под защитой или глинистого раствора, или обсадных труб, извлекаемых при бетонировании. Технология устройства буровых опор применяется такой же, как и для буронабивных свай. Нижние концы буровых опор обязательно доводят до плотных грунтов, поэтому они работают как опоры-стойки, что ограничивает возможности их широкого применения, иногда они выполняются с уширенной пятой и тогда относятся к висячим буровым опорам. Буровые опоры обладают несущей способностью до 10 МН и более, рассчитываются, как сваи-стойки, изготовленные в грунте.

Проектирование и устройство одиночных висячих трубчато-грунтовых буронабивных опор глубокого заложения с несущей способностью более 10 МН неизбежно ставят научно-техническую задачу, для решения которой необходимо провести требуемое экспериментально-теоретическое исследование. Проблема аналитической оценки предельной несущей способности и деформируемости оснований таких опор-фундаментов, соответствующей экспериментальным данным [1], потребовала проведения исследования. Богатый мировой опыт исследовательских, проектных и производственных работ по геотехнике фундаментостроения и проведенные авторами в последние годы теоретические исследования выявили возможность дальнейшего ее развития в различных грунтовых условиях. Одним из направлений геотехники фундаментостроения является геотехника буронабивного опоростроения, которая включает совокупность средств, созданных для осуществления теоретического обоснования и научно-технического сопровождения процессов проектирования, строительства, эксплуатации оснований буронабивных опор-фундаментов глубокого заложения. Основную часть средств составляют нелинейные геотехнологии, которые представляют собой теорию, методы и практику освоения техники. Усовершенствованные методологии базируются на положениях новой теории нелинейного упругопластическивязкого деформирования предельно-напряженных грунтов [2] и завершенной модели аналитической нелинейной механики грунтов [3] и доведены до стадии, удобной для практического инженерного применения в аналитическом исполнении. На основе теоретических положений разработана на уровне

изображений технология работ по устройству новых типов буронабивных свай с применением специального высокоэффективного взрывофугасного оборудования для частичного набивного грунтовытеснения оснований их буровых скважин и выполнения таким образом их рациональных трубчато-заполненных конструкций.

Разработаны следующие методологии научно-технического сопровождения нелинейных геотехнологий проектирования, строительства и эксплуатации одиночных висячих составных трубчато-заполненных конструктивно-грунтовых буронабивных опор-фундаментов глубокого заложения:

- теоретическое обоснование предварительно предельно-напряженного состояния основания буровой скважины в процессе дополнительного набивного ее грунтовытеснения;

- теоретическое построение геометрической формы уплотненно-го ядра грунта под плоской подошвой нижнего конца буронабивной опоры под действием общей нагрузки на грунт [4] как ее несущего составного грунтового элемента в виде тангенсоида вращения, представление нового типа составной конструктивно-грунтовой буронабивной опоры-фундамента глубокого заложения;

- теоретическое определение расчетного сопротивления грунтов основания по боковым поверхностям составного конструктивного элемента – ствола и несущего грунтового элемента – тангенсоида вращения буронабивной опоры и их предельных несущих способностей;

- теоретическое определения напряженно-деформированного состояния основания конструктивно-грунтовой буронабивной опоры;

- теоретическое построение расчетных графиков зависимостей осадок от нагрузок: общего упругопластическивязкого деформирования и отдельных графиков для боковых поверхностей составного конструктивного элемента – ствола и несущего составного грунтового элемента – тангенсоида вращения буронабивной опоры.

Показаны конструктивные схемы буронабивной опоры, построена геометрическая форма несущего составного грунтового элемента – тангенсоида вращения буронабивной опоры под нижним концом ствола, изображены схемы развития напряженно-деформированного состояния основания конструктивно-грунтовой буронабивной опоры, построены расчетные графики зависимостей осадок от нагрузок составной конструктивно-грунтовой буронабивной опоры-фундамента глубокого заложения, сделаны выводы.

## Обзорное экспериментально-расчетное исследование условий формирования предельной несущей способности и деформации основания буронабивных свай

Перед началом проектирования и устройства свайных фундаментов под опоры водоводов Загорской гидроаккумулирующей электростанции были проведены опытные работы по отработке технологии изготовления и определению их несущей способности [1]. Проведены исследования оснований буронабивных свай № 4 и 7. Размеры сваи № 4: диаметр 1 м, длина 17 м без уширения; сваи № 7: диаметр ствола 1 м, диаметр уширения 1,54 м, длина 18,3 м. По результатам экспериментального исследования значения предельных несущих способностей основания буронабивной сваи № 4 составило 7610 кН, а сваи № 7 – 7915,5 кН.

Состав грунтового основания: с поверхности до глубины 5 м залегают покровные и до глубины 35 м подстилающие моренные суглинки с включениями гравия, гальки, валунов. Физико-механические характеристики грунтов представлены в табл. 1.

Таблица 1

### Физико-механические характеристики грунтов

Плотность естественная $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Плотность скелета $\rho_d$ , г/см <sup>3</sup>	Влажность естественная $W$ , %	Показатель текучести $I_L$	Модуль деформации $E$ , МПа	Удельное сцепление $C$ , кПа	Угол внутреннего трения $\varphi$ , град	Коэффициент пористости $e$
1,92	1,54	24,4	0,05	10,7	13	24	0,74

Давление бетона  $\sigma_r$  на стенки скважины № 7 измерялось после бетонирования и при нагружении с помощью тензорезисторных месдоз. Бетонирование проводилось через бункер с направляющим патрубком. Бетонная смесь с осадкой конуса 20–22 см подавалась в скважину прямым сбросом. Показания по месдозам снимались после сброса в скважину бетона с удельным весом  $\gamma_6 = 23,3$  кН/м<sup>3</sup> из бадьи объемом 3 м<sup>3</sup>. Характер распределения горизонтальных давлений бетона  $\sigma_r$ , измеренных месдозами по глубине сваи № 7 после бетонирования и при нагружении, показан на рис. 1.

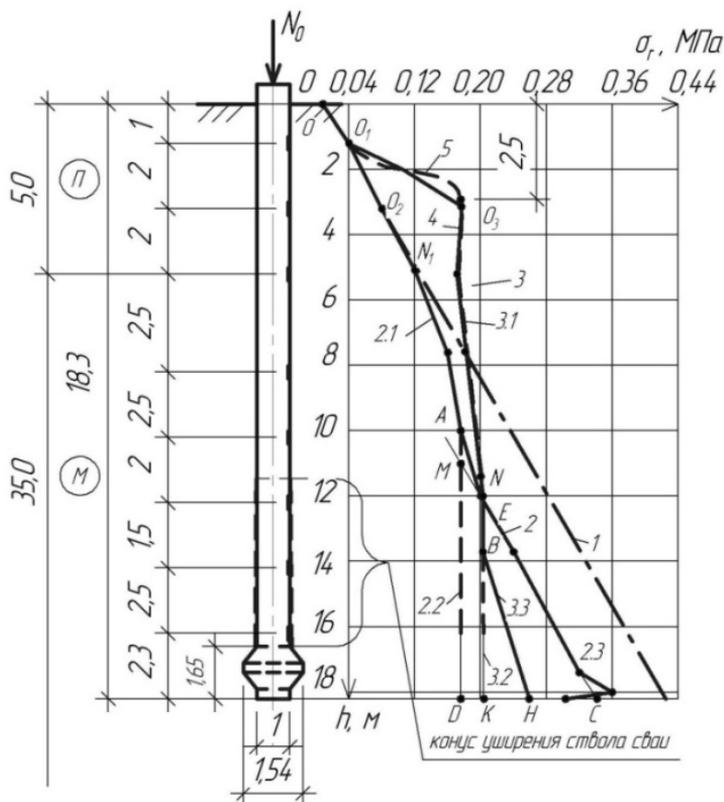


Рис. 1. Эпюры радиального давления  $\sigma_r$  по длине сваи № 7 после бетонирования и при нагружении: 1 – гидростатическое давление бетонной смеси; 2 – после заполнения скважины; 3 – при нагрузке 7600 кН; 4 – расчетная эпюра давления связности грунта; 5 – расчетный нелинейный график бокового давления связности грунта до глубины 2,5 м; П – покровный суглинок; М – моренный суглинок

Бурунабивные сваи через 2–6 месяцев после изготовления испытывались осевой вертикальной статической нагрузкой. График зависимости осадки от нагрузки сваи № 4 показан на рис. 2.

Предельная несущая способность нижнего конца сваи № 4 определена по данным расчетного исследования несущей способности сваи № 7 [5]

$$F_{d,н.к} = 520 \text{ кН.}$$

Предельная несущая способность боковой поверхности ствола сваи № 4

$$\Delta F_{d,6.п} = F_d - F_{d,н.к} = 7090 \text{ кН.} \quad (1)$$

Предельная несущая способность сваи № 4 принята по линейному экспериментальному графику 2, см. рис. 2

$$F_d = 7610 \text{ кН.}$$

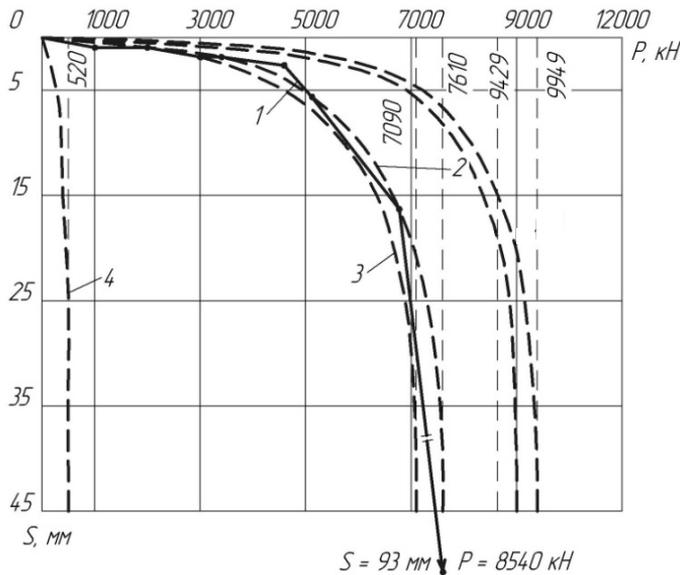


Рис. 2. Графики зависимости осадки от нагрузок буронабивной сваи № 4:  
 1 – экспериментальный; 2 – нелинейный по экспериментальным данным;  
 3 – расчетный по боковой поверхности ствола сваи по данным опыта;  
 4 – расчетный плоского нижнего конца сваи

Установление глубины начала расширения скважины производится расчетом по предельной несущей способности боковой поверхности цилиндрической части ствола сваи № 7 с использованием экспериментальных значений давлений в точках графика эпюры 3 на глубинах: 1 м –  $\sigma_{r,1} = 40$  кПа; 3 м –  $\sigma_{r,2} = 172$  кПа; 12 м и ниже –  $\sigma_{r,4} = 210$  кПа.

$$h_{mc} = F_{d,б.п} - (\tau_{n.c,1}A_1 + \tau_{n.c,2}A_2 + \tau_{n.c,3}A_3) / 2\pi R\tau_{mc} = 8,2 \text{ м.} \quad (2)$$

Глубина цилиндрической части ствола сваи

$$h_{ц} = h_{n.c} + h_{mc} = 13,2 \text{ м.} \quad (3)$$

Потерянное значение несущей способности по боковой поверхности ствола сваи № 4 в результате технологического дефекта

$$F_{d,т.д} = (2\pi R(h - h_{ц})\tau_{mc} = 2339 \text{ кН.} \quad (4)$$

Физически возможная предельная несущая способность боковой поверхности по опытным данным без учета технологического дефекта

$$F_{d,б.п} = \Delta F_{d,б.п} + F_{d,т.д} = 9429 \text{ кН.} \quad (5)$$

Общая физически возможная предельная несущая способность сваи № 4 без учета технологического дефекта

$$F_d = F_{d,б.п} + F_{d,н.к} = 9949 \text{ кН.} \quad (6)$$

Таким образом, при устройстве буронабивных свай следует применять надежные проверенные технологии, гарантирующие качество производства работ при набивке оснований буровых скважин и производить геотехнологический анализ несущей способности и деформации их оснований.

### **Геотехнология способа дополнительного набивного грунтовытеснения основания буровой скважины в буронабивную**

Для устройства буронабивных опор-фундаментов глубокого заложения применяются различные буровые технологии получения скважин. Устройство трубчато-заполненной конструкции ствола буронабивной опоры-фундамента глубокого заложения производится с помощью взрывофугасного способа возведения набивной трубчатой сваи, разработанного на уровне изобретения. Способ осуществляется с использованием взрывофугасного формователя буронабивной сваи, содержащего два полых трубчатых телескопически связанных и соосно подвижных между собой элемента: корпуса и рабочего органа. При этом рабочий орган снабжен камерой взрывания и раструбным коническим формующим нижним концом и содержит затвор – зарядоноситель для герметизации камеры взрывания. Диаметр рабочего органа предусматривается меньше диаметра буронабивной скважины на толщину стенки трубчатой оболочки сваи.

Способ возведения буронабивной трубчато-заполненной опоры включает образование буровой скважины. Установку в нее формователя соосно со скважиной. В пространство зазора между стенками скважины и формообразователя укладывается порция сухой бетонной смеси с одновременной укладкой порции дренирующей смеси заполнителя в полость рабочего органа формователя. Укладку бетонной смеси

и дренирующего материала производят по высоте скважины порциями. После укладки каждой порции внутри рабочего органа в камере взрывания размещают заряд взрывчатого вещества и герметизируют ее с помощью затвора-зарядоносителя.

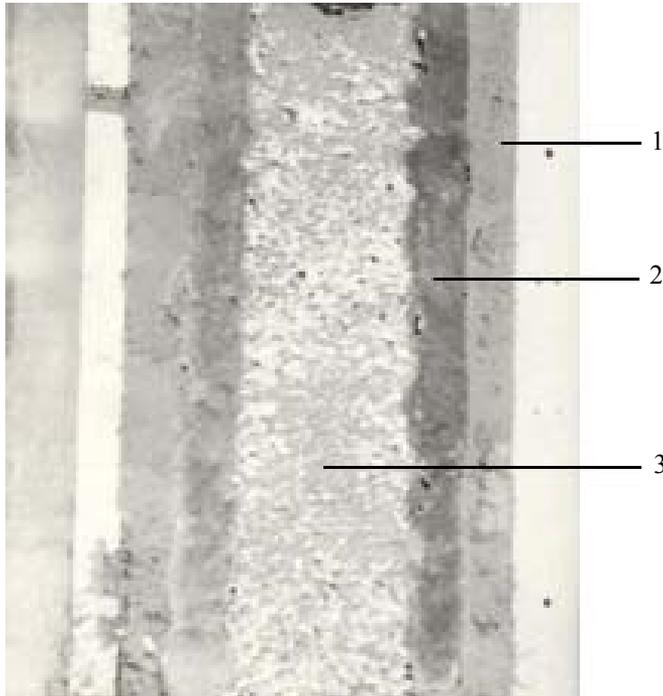


Рис. 3. Фрагмент разреза конструкции трубчато-заполненной буронабивной сваи, полученный в лотке: 1 – грунт, 2 – трубчатая оболочка, 3 – дренирующий наполнитель

Уплотнение сухой бетонной и дренирующей смеси, набивание основания буровой скважины путем дополнительного ее грунтовытеснения, создание зоны предварительно предельно-напряженного состояния основания вокруг буровой скважины в процессе дополнительного ее грунтовытеснения, подъем рабочего органа осуществляется путем взрыва заряда взрывчатого вещества в камере взрывания. После завершения возведения ствола буронабивной опоры до устья скважины производится увлажнение сухой бетонной смеси путем подачи воды и полного водонасыщения объема дренирующей смеси наполнителя.

Экспериментальные исследования способа устройства буронабивных свай проводились в лабораторных условиях с использованием

бездымного пороха (фрагмент сваи в разрезе показан на рис. 3) и в полевых натуральных условиях с помощью взрывофугасного формователя, представленного на рис. 4; на рис. 5 показан оголовок буронабивной трубчато-заполненной сваи.



Рис. 4. Взрывофугасный формователь ствола буронабивной трубчато-заполненной сваи



Рис. 5. Оголовок буронабивной трубчато-заполненной сваи:  
1 – трубчатая оболочка; 2 – дренирующий наполнитель

Важной задачей является определение значения сбega наружной поверхности раструбного конического рабочего органа формователя. Сбег должен учитывать значение сжимаемости сухой бетонной смеси в стенке трубчатой оболочки, которая будет зависеть от ее толщины; значение сжимаемости разрыхленного грунта в стенке буровой

скважины, которое зависит от вида грунта и применяемого бурового оборудования; значение деформации грунта основания буровой скважины при его набивании путем дополнительного грунтовытеснения в процессе создания предварительно предельно-напряженной зоны основания вокруг трубчатого-заполненного ствола буронабивной опоры.

Величина сбега будет зависеть от значения предельного-напряженного состояния основания по боковой поверхности буронабивной опоры. Значения сжимаемости сухой бетонной смеси при уплотнении и разрыхленного грунта в стенке буровой скважины должны определяться опытным путем. Сжимаемость основания буровой скважины при дополнительном ее грунтовытеснении в процессе набивания с образованием предварительно предельно-напряженной зоны вокруг скважины определяется по методологии техники нелинейной геотехнологии. Исследование проводится новыми методами аналитической нелинейной механики грунтов.

Напряженно-деформированное состояние основания вокруг ствола сваи определяется по следующей методике. Предельные нормальные давления связности и касательные сопротивления трения по боковой поверхности ствола сваи, определяются по уравнениям напряженного состояния грунтов

$$\sigma_{1-4} = \tau_{1-4} = \sigma_d \Sigma tg\theta_{1-4} k, \quad (7)$$

$$\sigma_5 = \tau_5 = (c + \sigma_d \Sigma tg\theta_{1-5}) k. \quad (8)$$

Углы внутренней связности и трения грунтов состояний предельных равновесий:

$$\theta_1 = \varphi, \quad (9)$$

$$\theta_2 = 22,5^\circ + \varphi / 2, \quad (10)$$

$$\theta_3 = 45^\circ, \quad (11)$$

$$\theta_4 = 67,5^\circ - \varphi / 2, \quad (12)$$

$$\theta_5 = 90^\circ - \varphi. \quad (13)$$

Коэффициенты увеличения напряжений от удельного давления объемной силы тяжести скелета сухого грунта  $\sigma_d$  и удельного сцепления  $c$

$$k = \sin\varphi + \cos\varphi. \quad (14)$$

Структурная прочность грунта

$$\sigma_{str} = \sigma_d \cos \varphi = 18,36 \text{ кПа.} \quad (15)$$

Начальное краевое напряжение упругости грунта по расчетному определению

$$\sigma_0 = 3,7 \text{ кПа.}$$

Расчетные значения показателей напряженного состояния предельных равновесий сведены в табл. 2.

Таблица 2

Углы и коэффициенты внутренней связности и трения грунта

Номер СР*	Суглинки									
	покровные					моренные				
	$\theta_i$ , град	$\text{tg}\theta_i$	$\Sigma \text{tg}\theta_i$	$\sigma_i = \tau_i$ , кПа	$\Sigma \sigma_i = \Sigma \tau_i$ , кПа	$\theta_i$ , град	$\text{tg}\theta_i$	$\Sigma \text{tg}\theta_i$	$\sigma_i = \tau_i$ , кПа	$\Sigma \sigma_i = \Sigma \tau_i$ , кПа
1	20	0,364	0,364	9,10	9,10	24	0,445	0,445	11,81	11,81
2	32,5	0,637	1,001	15,92	25,02	34,5	0,687	1,132	18,23	30,04
3	45	1	2,001	24,99	50,01	45	1	2,132	26,54	59,58
4	57,5	1,570	3,571	39,24	89,25	55,5	1,455	3,587	38,61	98,19
5	70	2,747	6,318	94,19	183,44	66	2,246	5,833	92,65	190,81

\* – состояние предельного равновесия.

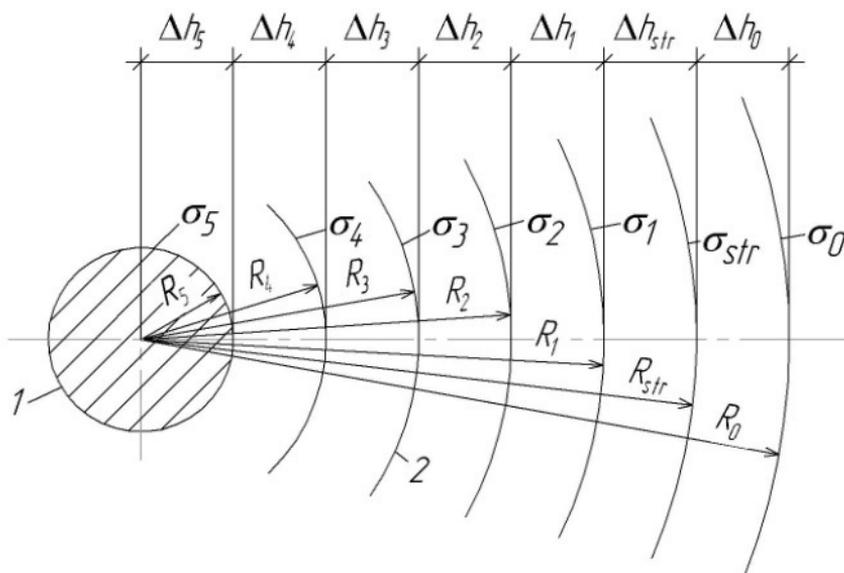


Рис. 6. Схема развития зон напряженно-деформированного состояния буронабивного основания вокруг ствола опоры:  
1 – опора; 2 – границы зон состояний предельных равновесий

После решения уравнений состояния с определением предельных значений напряжения вокруг ствола опоры, рассчитываются геометрические параметры и их соотношения для выбора физических уравнений. Схема развития зон предельно напряженно-деформированного состояния буронабивного основания вокруг ствола опоры представлена рис. 6.

Радиусы границ зон предельных напряжений в горизонтальной плоскости от боковой поверхности ствола опоры (численные значения табл. 3)

$$R_i = R_5 \sigma_5 / \sigma_i, \quad (16)$$

Мощность сжимаемых зон грунта между границами состояний предельных равновесий

$$\Delta h_4 = R_4 - R_5; \quad (17)$$

.....

$$\Delta h_0 = R_0 - R_{str}. \quad (21)$$

Сжимаемость каждой зоны грунта:

$$\Delta S_4 = [0,5(\sigma_5 + \sigma_4)\Delta h_4] / E_5^0; \quad (22)$$

.....

$$\Delta S_{str} = [0,5(\sigma_1 + \sigma_{str})\Delta h_{str}] / E_5^0; \quad (26)$$

$$\Delta S_0 = [0,5(\sigma_{str} + \sigma_0)\Delta h_0] / E_5^0, \quad (27)$$

где  $E_5^0$  – нелинейный модуль общей деформации.

$$E_5^0 = k_5^0 E = 64 \text{ МПа}, \quad (28)$$

где  $k_5^0 = 0,8206$  – поступенчатый эталонный коэффициент пропорциональности нелинейного модуля общей деформации суглинка.

Таблица 3

Значения предельно-равновесных деформаций моренного суглинка

Номер СПР*	$\theta_i$ , град	$\text{tg}\theta_i$	$\Sigma \text{tg}\theta_i$	$\sigma_i = \tau_i$ , кПа	$\Sigma \sigma_i = \tau_i$ , кПа	$R_i$ , м	$\Delta h_i$ , м	$\Delta S_i$ , мм
$\sigma_0$	–	–	–	3,7	–	25,78	20,86	3,58
$\sigma_{str}$	–	–	–	18,34	–	4,92	1,74	0,66
1	24	0,445	0,445	11,81	11,81	–	–	–

Окончание табл. 3

2	34,5	0,687	1,132	18,23	30,04	3,18	1,58	2,2
3	45	1	2,132	26,54	59,58	1,60	0,63	0,78
4	55,5	1,455	3,587	38,61	98,19	0,97	0,46	1,1
5	66	2,246	5,833	92,65	190,81	0,51	0,51	0
							Суммарная	8,3

\* – состояние предельного равновесия.

Суммарная деформация расширения буровой скважины в буронабивную  $S = \Sigma \Delta S_i = 8,3$  мм.

Следовательно, в процессе набивки основания буровой скважины взрывофугасным формователем её диаметр должен быть увеличен на 16,6 мм и для буронабивной скважины опоры может составить, например, 1020 мм.

Расчетная несущая способность боковой поверхности ствола буронабивной трубчато-заполненной опоры:

– слоя покровного суглинка

$$F_{d,п.с} = A_1\tau_1 + A_2\tau_2 + A_3\tau_3 = 2102,6 \text{ кН}, \quad (29)$$

– слоя моренного суглинка

$$F_{d,м.с} = A_{б.п}\tau_5 = 7332,8 \text{ кН}, \quad (30)$$

– общая несущая способность

$$F_{d,к.э} = F_{d,п.с} + F_{d,м.с} = 9435,4 \text{ кН}, \quad (31)$$

что получается несколько больше, чем по эксперименту при  $F_{d,б.п} = 9429$  кН.

### Геотехнология построения геометрической формы несущего грунтового элемента составной конструктивно-грунтовой буронабивной опоры

Под плоской подошвой круглого жесткого столбчатого фундамента формируется уплотненное ядро грунта в виде тангенсоида вращения, который принят за его несущий грунтовый элемент по данным источника.

Используя аналогию изобретений [4], мы предложили новый тип висячей составной конструктивно-грунтовой буронабивной опоры-фундамента глубокого заложения. Схема составной опоры показана на рис. 7.

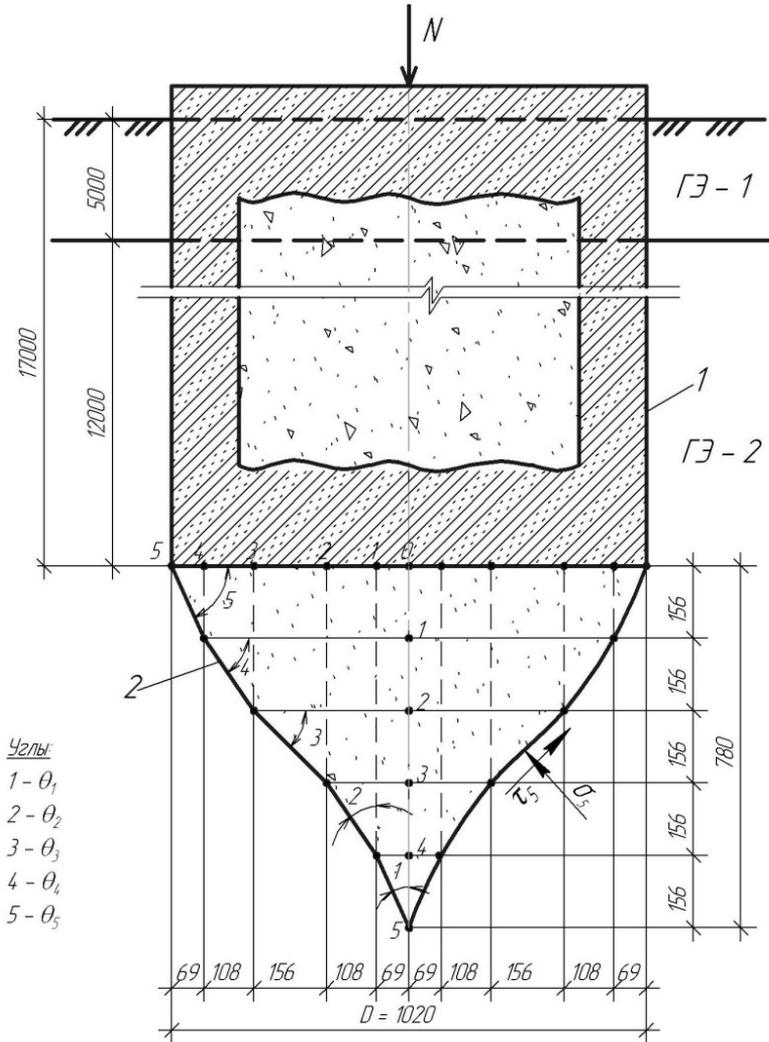


Рис. 7. Схема составной конструктивно-грунтовой буронабивной опоры-фундамента глубокого заложения: 1 – конструктивный элемент – трубчато-заполненный ствол; 2 – грунтовый элемент в форме тангенсоида вращения; ГЭ-1 – покровный суглинок; ГЭ-2 – моренный суглинок

Она состоит из несущего составного конструктивного элемента – трубчато-заполненного ствола и несущего составного грунтового элемента в форме тангенсоида вращения.

Построение составного грунтового элемента в виде тангенсоида вращения производится с использованием значения радиуса буронабивной опоры  $R = 0,51$  м, величин углов внутренней связности и трения  $\theta_1$ ,

$\theta_2$ ,  $\theta_3$ , и значений их тангенсов  $\text{tg}\theta_i$  (см. табл. 3). Определяется суммарное значение  $\Sigma\text{tg}\theta_i = \Sigma\text{tg}\theta_{1,2,3}$  и рассчитываются длины отрезков радиуса

$$\Delta R_{2-3} = R\text{tg}\theta_3 / \Sigma\text{tg}\theta_i = 156 \text{ мм}, \quad (32)$$

$$\Delta R_{3-4} = \Delta R_{1-2} = R\text{tg}\theta_2 / \Sigma\text{tg}\theta_i = 108 \text{ мм}, \quad (33)$$

$$\Delta R_{4-5} = \Delta R_{0-1} = R\text{tg}\theta_1 / \Sigma\text{tg}\theta_i = 69 \text{ мм}. \quad (34)$$

По значению длины отрезка радиуса  $\Delta R_{2-3} = 156 \text{ мм}$ , равного значению высоты другого катета  $\Delta h_3$ , принимаются размеры всех остальных  $\Delta h_i = 156 \text{ мм}$ , их суммарная величина определяет высоту тангенсоида вращения или несущего составного грунтового элемента  $h = 780 \text{ мм}$ .

Уравнение напряженного состояния пятого предельного равновесия грунта по боковой поверхности тангенсоида вращения

$$\sigma_5 = \tau_5 = [(\sigma_d + c)\Sigma\text{tg}\theta_{0-5}]k = 347,3 \text{ кПа}. \quad (35)$$

Предельное расчетное сопротивление грунта по боковой поверхности несущего грунтового элемента

$$R_u = \tau_5 = 347,3 \text{ кПа}. \quad (36)$$

Расчетная предельная несущая способность основания составного грунтового элемента в виде тангенсоида вращения

$$F_{d,г.э} = \tau_5 A_{б.п} = R_u A_{б.п.т} = 527,9 \text{ кН}, \quad (37)$$

где  $A_{б.п.т}$  – площадь боковой поверхности тангенсоида вращения.

С целью упрощения расчета площадь боковой поверхности тангенсоида вращения определяется по формуле конуса с диаметром основания  $D$  и высотой  $h$ , равной высоте тангенсоида

$$A_{б.п.т} = \pi R^2 / \sin \alpha = 1,52 \text{ м}^2, \quad (38)$$

Расчетная предельная несущая способность составной конструктивно-грунтовой буронабивной опоры

$$F_d = F_{d,к.э} + F_{d,г.э} = 9963 \text{ кН}, \quad (39)$$

что практически совпадает с результатом экспериментально-расчетного исследования при  $F_d = 9949 \text{ кН}$ .

Следовательно, выбор уравнений напряженных состояний предельных равновесий можно считать объективным, сравнимым с экспериментальным содержанием.

### **Геотехнология теоретического исследования предельной нелинейной деформации основания и построения расчетных графиков зависимостей осадки от нагрузки буронабивной опоры**

Опытная предельная осадка буронабивной сваи № 4 получена равной 35 мм (см. рис. 2). Теоретическое определение предельной осадки буронабивной опоры базируется на предположении о том, что она формируется исключительно как результат деформации основания под нижним плоским концом конструктивного элемента – ствола опоры. На рис. 8 изображена расчетная схема тангенсоида вращения несущего грунтового элемента 2.

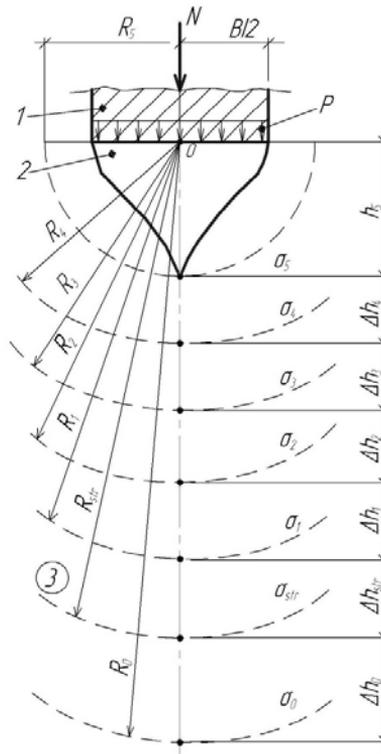


Рис. 8. Схема развития зон предельных напряженно-деформированных состояний грунта под конструктивно-грунтовой опорой:

1 – конструктивный элемент; 2 – грунтовой элемент;

3 – поле напряжений

Предельные сжимающие нормальные напряжения  $\sigma_i$  и равные им по значению сдвиговые касательные  $\tau_i$  по состояниям предельного равновесия грунта

$$\sigma_i = \tau_i = (\sigma_d + c) \Sigma \operatorname{tg} \theta_i k. \quad (40)$$

Их значения показаны в табл. 3.

Геометрические параметры и их соотношения рассчитываются для выбора физических уравнений по начальным, промежуточным и конечным краевым предельным напряжениям в его основании. Конечное максимальное краевое предельное напряжение  $\sigma_5$  ограничивается полупространством с основанием радиусом  $R_5$ , совмещенным с плоскостью нижнего конца ствола опоры по ее оси в точке  $O$  с совмещением вершины тангенсоида вращения с поверхностью зоны полупространства.

Радиусы границ зон предельных напряжений по глубине ограниченного полупространства по формуле (16)

$$R_i = R_5 \sigma_5 / \sigma_i,$$

Их значения показаны в табл. 4.

Мощность сжимаемых слоев грунта между границами полусфер

$$\Delta h_5 = R_5, \quad (41)$$

и по формулам (17–21)

$$\Delta h_4 = R_4 - R_5;$$

.....

$$\Delta h_0 = R_0 - R_{str}.$$

Сжимаемость каждого слоя грунта

$$\Delta S_5 = [0,5(P + \sigma_5) \Delta h_5] / E_5^0, \quad (42)$$

и по формулам (22–27)

$$\Delta S_4 = [0,5(\sigma_5 + \sigma_4) \Delta h_4] / E_5^0,$$

.....

$$\Delta S_{str} = [0,5(\sigma_1 + \sigma_{str}) \Delta h_{str}] / E_5^0,$$

$$\Delta S_0 = [0,5(\sigma_{str} + \sigma_0) \Delta h_0] / E_5^0.$$

Контактное давление по плоскому нижнему концу ствола опоры

$$P = F_{d,r.э} / A = 646,3 \text{ кПа}. \quad (43)$$

Таблица 4

Значения параметров для расчета нелинейной осадки

Номер СПР*	$\theta_i$ , град	$\text{tg}\theta_i$	$\Sigma\text{tg}\theta_i$	$\sigma_i = \tau_i$ , кПа	$\Sigma\sigma_i = \Sigma\tau_i$ , кПа	$R_i$ , м	$\Delta h_i$ , м	$\Delta S_i$ , мм
$\sigma_0$	–	–	–	3,70	–	86,26	71,69	12,0
$\sigma_{str}$	–	–	–	18,34	–	14,57	4,88	1,6
1	24	0,445	0,445	26,51	26,51	10,09	6,12	4,5
2	34,5	0,687	1,132	40,92	67,43	3,97	1,86	2,8
3	45	1	2,132	59,54	127,0	2,11	0,86	2,3
4	55,5	1,455	3,587	86,63	213,6	1,25	0,48	2,1
5	66	2,246	5,833	133,7	347,3	0,78	0,78	8,9
$P$	–	–	–	646,3	–	–	–	–
Суммарная								34,2

\* – состояние предельного равновесия.

Суммарная осадка по расчетному исследованию

$$S = \Sigma\Delta S_i = 34,2 \text{ мм}, \quad (44)$$

что практически совпадает с экспериментальной осадкой  $S = 35$  мм (см. рис. 2).

Таким образом, осадка конструктивно-грунтовой буронабивной опоры формируется исключительно как результат деформации основания под несущим грунтовым элементом.

По аналогии с показанной методикой расчета краевой осадки грунтового элемента на пятом состоянии предельного равновесия определяются промежуточные и начальная последовательно от четвертого до первого состояния предельных равновесий, оцениваемых значениями углов внутренней связности и трения соответственно  $\theta_4 \dots \theta_1$ . По результатам расчета несущих способностей и осадок по состояниям предельных равновесий в основании грунтового элемента конструктивно-грунтовой опоры выстраивается график их зависимости  $l$ , (рис. 9.) Параллельно оси нагрузки  $P$  системы координат проводятся линии через точки осадок по графику  $l$ . На линиях от оси ординат откладываются отрезки значений несущих способностей боковой поверхности ствола опоры по всем пяти состояниям предельного равновесия. Нелинейное соединение точек образует график зависимости осадки от нагрузки его боковой поверхности 2. Далее, по суммарным значениям нагрузок на грунтовой элемент и боковую поверхность

ствола на линиях откладывают точки. По отложенным точкам проводится общий нелинейный график зависимости осадки от нагрузки 3.

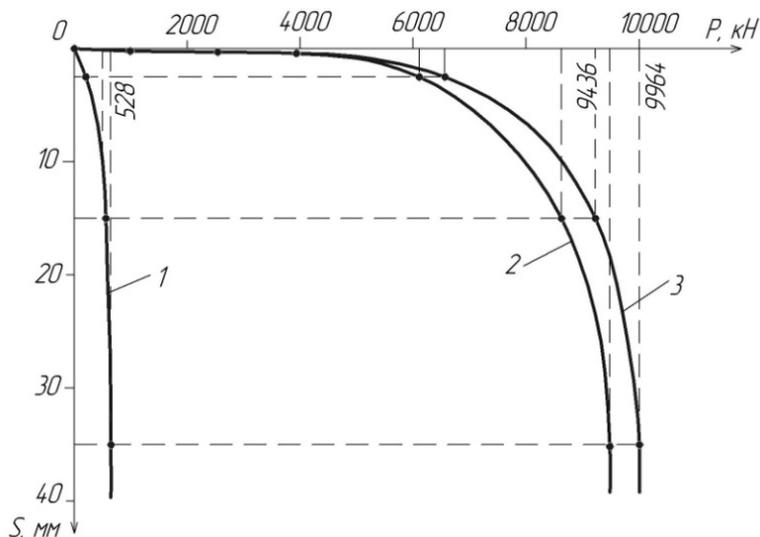


Рис. 9. Графики зависимостей осадок от нагрузок: отдельных по грунтовому элементу 1 и по стволу конструктивного элемента 2, общего для конструктивно-грунтовой опоры 3

Следовательно, общая осадка висячей конструктивно-грунтовой буронабивной опоры-фундамента глубокого заложения определяется деформируемостью основания под грунтовым элементом.

### Выводы

1. Впервые обоснована геотехника буронабивного опоростроения глубокого заложения с использованием положений новой аналитической нелинейной механики грунтов.

2. Разработана нелинейная геотехнология способа взрывофугасного набивания основания буровой скважины в процессе устройства трубчато-заполненного ствола буронабивной опоры-фундамента глубокого заложения.

3. Предложена нелинейная геотехнология теоретического построения геометрической формы уплотненного ядра грунта в виде тангенсоида вращения, используемого в качестве несущего составного грунтового элемента конструктивно-грунтовой буронабивной опоры-фундамента глубокого заложения.

4. Создан новый тип фундамента глубокого заложения в виде висячей составной конструктивно-грунтовой буронабивной опоры с несущим составным конструктивным элементом – трубчато-заполненным стволом и несущим составным грунтовым элементом – тангенсоидом вращения.

5. Показана нелинейная геотехнология теоретического определения напряженного состояния грунтов основания по боковым поверхностям несущих конструктивного и грунтового элементов и их несущей способности по пяти состояниям предельных равновесий.

6. Разработана нелинейная геотехнология теоретического определения деформированного состояния грунтов основания конструктивного и грунтового элементов.

7. Предложена нелинейная геотехнология теоретического построения расчетных графиков зависимостей осадок от нагрузок отдельно для грунтового и конструктивного элементов и общего для конструктивно-грунтовой опоры.

### **Библиографический список**

1. Мамонов М.В., Ермошкин П.М. Исследование условий формирования несущей способности и прочности стволов буронабивных свай // Основания, фундаменты и механика грунтов.– М.: Стройиздат, 1982. - № 1. – С. 10–14.

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

3. Борозенец Л.М. Нелинейная механика вытеснения дисперсных грунтов в основаниях фундаментов // Геотехника Беларуси: наука и практика: материалы междунар. науч.-техн. конф. Ч. 1;2); БНТУ. – Минск, – 2013. – С. 183–194.

4. Борозенец Л.М., Будыльская Е.А., Райченко Р.И. Расчётное исследование и построение эпюры реактивного контактного давления грунта на плоскую подошву жёсткого фундамента // Градостроительство, реконструкция и инженерное обеспечение устойчивого развития городов Поволжья: сб. тр. III Всероссийской науч.-практ. конф.; ТГУ. – Тольятти, 2012. – С. 26–33.

5. Борозенец Л.М. Расчётное исследование предельной несущей способности и нелинейной деформации основания опытной буронабивной сваи Геотехника Беларуси: наука и практика: материалы междунар. науч.-техн. конф. (Ч. 1, 2), БНТУ. – Минск, 2013. – С. 195–203.

### References

1. Mamonov M.V., Ermoshkin P.M. Issledovanie uslovij formirovaniya nesuschej sposobnosti i prochnosti stvolov buronabivnyih svaj [Research of conditions of formation of the bearing capacity and strength stems bored piles]. *Osnovaniya, fundamenty i mehanika gruntov*, 1982, no. 1. pp. 10-14.

2. Borozenets L.M. Model teorii nelineynogo uprugogo i plasticheskogo defor-mirovaniya dispersnyikh gruntov v osnovaniyakh fundamentov [Model theory of nonlinear elastic and plastic deformation of disperse soil in the foundation base]. *Sbornik materialov Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Mekhanika gruntov v geotekhnike i fundamentostroenii»*: Novocherkassk, 2012. pp. 102-109.

3. Borozenets L.M. Nelineynaya mehanika vyitesneniya dispersnyih gruntov v osno-vaniyah fundamentov [Nonlinear mechanics of repression disperse soils in the foundation base]. *Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Geotekhnika Belarusi: nauka i praktika»*, Minsk, 2013, vol. 1-2. pp. 183-194.

4. Borozenets L.M., Budyil'skaya E.A., Raychenko R.I. Raschyotnoe issledovanie i postroenie epyury reaktivnogo kontaktnogo davleniya grunta na ploskuyu podoshvu zhyostkogo fundamenta [Computational research and construction diagrams reactive soil contact pressure on a flat hard foundation level]. *Sbornik trudov III Vserossiyskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii «Gradostroitelstvo, rekonstruktsiya i inzhenernoe obespechenie ustoychivogo razvitiya gorodov Povolzhya»*, Tolyatti, 2012. pp. 26-33.

5. Borozenets L.M. Raschyotnoe issledovanie predelnoj nesuschej sposobnosti i ne-lineynoy deformatsii osnovaniya opytnoj buronabivnoj svai [Computational research ultimate load capacity and nonlinear deformation of the base pilot bored piles]. *Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Geotekhnika Belarusi: nauka i praktika»*, Minsk, 2013, vol. 1-2. pp. 195-203.

### **Об авторах**

**Борозенец Леонид Михайлович** (Тольятти, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленное и гражданское строительство» Тольяттинского государственного университета; e-mail: tsp@tltsu.ru

**Будыльская Екатерина Андреевна** (Тольятти, Россия) – инженер кафедры «Промышленное и гражданское строительство» Тольяттинского государственного университета; e-mail: tsp@tltsu.ru

### **About the authors**

**Boronesetz Leonid Mikhailovich** (Togliatti, Russian Federation) – Ph. D, in Technical Sciences the Professor of the Department “Industrial and civil construction”, Togliatty State University; e-mail: tsp@tltsu.ru

**Budylskaya Ekaterina Andreevna** (Togliatti, Russian Federation) – engineer of the Department “Industrial and civil construction”, Togliatty State University; e-mail: tsp@tltsu.ru

Получено 31.03.2014