

УДК 622.279.23/4

**Юшков Борис Семенович**

Пермский национальный исследовательский университет  
Россия, Пермь<sup>1</sup>

Зав. кафедрой автомобильных дорог и мостов

Кандидат технических наук

Доцент, действительный член Академии транспорта России

E-Mail: [adf@pstu.ru](mailto:adf@pstu.ru)

## Обустройство фундаментов нефтедобывающих установок

**Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы по обустройству фундаментов нефтедобывающих устройств на сезонно промерзающих грунтах. Водонасыщенные глинистые грунты при промерзании увеличиваются в объеме и вытесняют внедренные в них призматические сваи, которые при неравномерном поднятии нарушают целостность фундамента и приводят к поломке нефтедобывающих устройств и разливу нефти на поверхности грунта. В статье предлагается двухконусная свая, обратный конус которой препятствует поднятию сваи силами морозного пучения. Приведен пример расчета сваи, работающей в составе куста свай с учетом глубины промерзания и действия сил морозного пучения.

**Ключевые слова:** фундамент; двухконусная свая; морозное пучение грунтов; эксперимент; расчет, глинистый грунт; касательные напряжения; силы трения; консолидация.

---

<sup>1</sup> 614013, Пермь, ул. Академика Королева, дом 19, автодорожный факультет

С увеличением объемов добычи нефти идет процесс освоения новых месторождений. Новые месторождения располагаются в основном в местностях с суровым климатом. Одной из проблем, возникающих при работе нефтедобывающей промышленности, является сезонное пучение глинистых грунтов. Сезонное промерзание грунтов наблюдается на территории, занимающей 40 % всей площади России [3]. Проблема стоит в таких регионах, как Урал, Карелия, Сибирь, Забайкалье. Явление морозного пучения наблюдается практически по всей территории России.

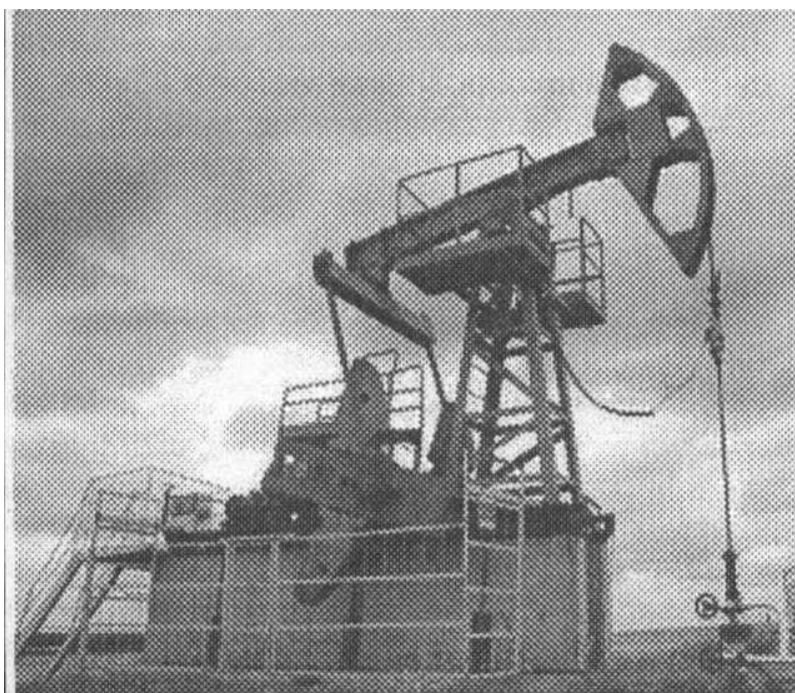
При обустройстве фундаментов под установки необходимо использовать специальные фундаменты или применять мероприятия по уменьшению действия вредных сил морозного пучения [8]. В пучинистых грунтах (водонасыщенные глины, суглинки, супеси, мелкие и пылеватые пески) силы морозного пучения достигают 100...150 кПа (10...15 тс/м<sup>2</sup>) и, действуя на фундамент снизу вверх, часто превосходят нагрузки вышерасположенных конструкций. Сезонные вертикальные перемещения поверхностного слоя грунта при его промерзании до 1,5 м составляют  $\cong 10 \dots 15$  см. [9].

Обустройство фундаментов в нефтедобывающих устройствах (качалках) является технологически сложным процессом. Так как необходимо соблюдение особых параметров, допускаемые отклонения от горизонтальности: в поперечном направлении - 2 мм/м; в продольном направлении - 4 мм/м. Это достигается путем точной установки рамы стан качалки на фундаментную плиту. Изменение высотных характеристик опор в процессе эксплуатации приводит к поломкам частей конструкций насосов и их приводов.

Фундамент под станок-качалку может быть монолитным железобетонным, сборным железобетонным и металлическим. При этом следует обратить внимание на выполнение безосадочного основания для обеспечения сохранения горизонтального положения фундамента и станка-качалки в процессе эксплуатации.

В общем случае производится обустройство фундамента под установку на монолитных плитах. Но так как опорная плита должна нести существенную нагрузку (от 2,5 до 30 т), то фундамент усиливают несущими сваями. Такое обустройство фундамента под установку является наиболее экономически обоснованным. Однако при обустройстве фундамента в особых геологических условиях необходимо принимать ряд мероприятий, которые увеличивают стоимость работ по подготовке к установке станка-качалки.

Так, при обустройстве фундаментов в зонах вечной мерзлоты существует необходимость использовать специальные свайные основания (рис. 1).



*Рис. 1. Станок-качалка ПНШС-80 для использования в зонах вечной мерзлоты*

Для устройства фундамента на сезоннопромерзающих пучинистых грунтах существует ряд мероприятий по уменьшению вредного влияния сил морозного пучения, таких как:

- уменьшение периметра фундамента;
- утепление поверхности грунта около фундаментов и свайных опор сооружений;
- устройство обсыпки из несмерзающихся материалов (гравий, песок, гидрофобные порошки);
- полная замена пучинистого грунта на непучинистый;
- использование догружающих материалов для увеличения загрузки на фундамент;
- использование засоления почв;
- осушение грунта путем дренирования и тщательного отвода поверхностных вод.

Все вышеперечисленные мероприятия являются трудоемкими и ресурсозатратными, некоторые несут экологическую опасность. Для облегчения строительства, ускорения работ по обустройству фундамента, а также увеличения экологической безопасности необходимо использовать прогрессивные методы в устройстве фундаментов [7].

Наиболее распространенными и быстрыми по обустройству являются свайные фундаменты [5]. Однако следует учитывать, что не все сваи могут подойти к использованию в сезоннопромерзающих пучинистых грунтах.

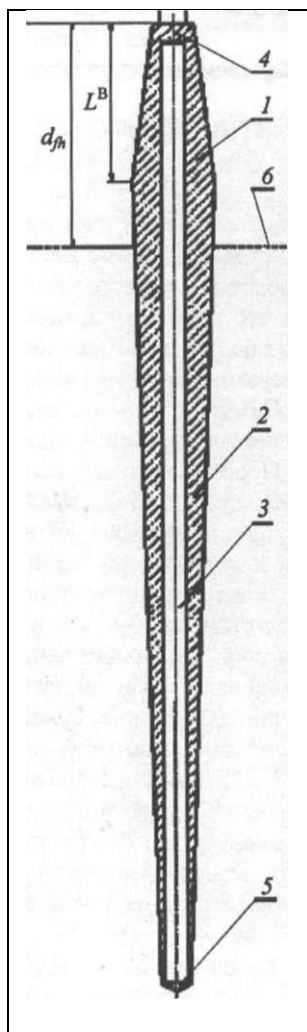
На кафедре автомобильных дорог и мостов Пермского национального исследовательского политехнического университета продолжают работы по совершенствованию конических пустотелых свай. В частности разработана конструкция полых свай с разнонаправленной конусностью (рис. 2).

Свая [1] представляет полую конструкцию, имеющую конусность в сторону острия и головы сваи, выполненную центрифугированием.

Длина работающей в талом грунте нижней части сваи, определяющая ее несущую способность, устанавливается по «Рекомендациям по применению полых конических свай повышенной несущей способности в развитие требований СНиП 2.02.03—85 «Свайные фундаменты».

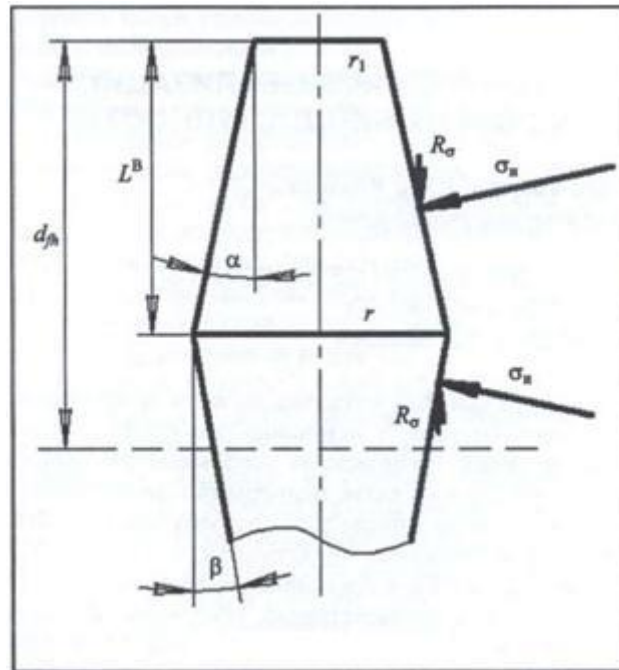
Нижняя конусная часть сваи несет всю нагрузку от установки и самой фундаментной плиты. По проведенным нами исследованиям [2] можно сделать обобщенный вывод, что конусность сваи увеличивает несущую способность по сравнению с призматической. Это дает нам право утверждать, что применение коротких свай с конусностью имеет аналогичный результат с более длинной призматической свайей.

Верхняя конусная часть дает существенное сопротивление силам морозного пучения. По результатам экспериментов, проведенных сотрудниками кафедры, оптимальный угол сбega должен составлять  $2^\circ$ . При погружении сваи образуется щель между грунтом и верхней частью обратной конусностью сваи, которую рекомендуется заполнить гравием или щебнем, чтобы полностью ликвидировать выпор сваи [10].



**Рис. 2.** Конструкция сваи: 1 - верхняя конусная часть; 2 - нижняя конусная часть; 3 - внутренняя полость; 4 - верхний торец сваи; 5 - нижний торец сваи; 6 - граница сезоннопромерзающего грунта;  $L^B$  - длина верхней части;  $d_{fn}$  - нормативная глубина промерзания

На рис. 3 приведена расчетная схема силового воздействия замерзающего грунта при образовании ледяных кристаллов в зоне сезоннопромерзающего грунта.



**Рис. 3.** Расчетная схема

Уравнение устойчивости двухконусной сваи в пучинистом грунте представлено в виде:

$$P_{дв.} = P_{кон.} - K \cdot R_{\sigma_1} \cdot S_1 + K \cdot R_{\sigma_2} \cdot S_2$$

где  $P_{кон.}$  - несущая способность нижней части двухконусной сваи;  $R_{\sigma_1}$  и  $R_{\sigma_2}$  - вертикальные составляющие нормального давления морозного пучения грунта  $\sigma_n$ ;  $K$  - коэффициент, учитывающий снижение действия сил морозного пучения грунта по глубине при сезонном промерзании [6];  $S_1$  - площадь боковой поверхности верхней части двухконусной сваи;  $S_2$  - площадь боковой поверхности нижней части двухконусной сваи, находящейся в пучинистом грунте.

С помощью формул элементарной математики и некоторых преобразований составим систему уравнений и приведем уравнение устойчивости в более подробный вид.

$$R_{\sigma_1} = \sigma_n \cdot \sin \alpha;$$

$$R_{\sigma_2} = \sigma_n \cdot \sin \beta;$$

$$S_1 = \frac{\pi \cdot (r^2 - r_1^2)}{\cos(\pi - \alpha)};$$

$$\begin{aligned} S_2 &= \frac{\pi}{\cos(\pi - \alpha)} \cdot \left[ r^2 - \left( r - \frac{d_{fh} - L^B}{\operatorname{tg}(\pi - \beta)} \right)^2 \right] = \\ &= \frac{\pi}{\cos(\pi - \alpha)} \cdot \left[ r^2 - \left( r - \frac{d_{fh} \cdot (1 - \lambda)}{\operatorname{tg}(\pi - \beta)} \right)^2 \right]. \end{aligned}$$

где  $r$  и  $r_1$  - геометрические характеристики сваи, соответственно радиусы оголовка и перехода конусов сваи;  $\alpha$  и  $\beta$  - углы сбega, соответственно верхнего и нижнего конусов;  $d_{fh}$

- нормативная глубина промерзания;  $\lambda$  - коэффициент неравномерности промерзания грунта, устанавливается экспериментально и зависит от природно-климатических условий зоны, в Пермском крае равен 0,6 (по экспериментальным данным) [4].

Пример расчета величины выпирания куста свай, забитых под нефтедобывающую установку.

Для расчета двуконусной сваи длиной 3 м с характеристиками, приведенными на рис. 2, работающей в составе куста из 4 свай, от действия сил морозного пучения. В качестве исходных используем экспериментальные данные, полученные за период наблюдений в течение зимнего сезона 2010/2011 гг.

Исходные данные для расчета:

- максимальная глубина промерзания грунта  $d_f = 1,36$  м;
- средний модуль деформации слоя грунта в пределах длины сваи  $E = 6,5$  МПа;
- коэффициенты относительной поперечной деформации: мерзлого грунта  $\nu = 0,25$ , талого грунта  $\nu = 0,42$ ;
- величина подъема свободной поверхности грунта при морозном пучении  $h_f = 0,09$  м;
- приведенная величина пучения  $h_f^{np1} = \frac{h_f}{2} = 0,045$  м;
- приведенная величина пучения в предположении изменения  $\varepsilon_0$  по закону квадратной параболы  $h_f^{np2} = \frac{h_f}{3} = 0,03$  м;
- средний радиус сваи в пределах глубины промерзания  $R_{cp}^M = 0,22$  м;
- средний радиус сваи в пределах толщи талого грунта  $R_{cp}^T = 0,19$  м;
- длина сваи  $l = 3$  м;
- средний периметр сваи: в пределах промерзшей толщи  $U_{cp}^M = 1,38$  м, в пределах слоя талого грунта  $U_{cp}^T = 1,19$  м;
- угол наклона верхнего конуса сваи к её оси  $\alpha = 4,54^\circ$ ,  $\text{tg}\alpha = 0,0794$ ;
- расчетное сопротивление грунта основания по боковой поверхности  $f = 14$  кПа =  $14$  кН/м<sup>2</sup> (табл. 2 СНиП 2.02.03–85);
- вес сваи  $P = 9,41$  кН;
- нагрузка на сваю  $N = 0$ .

Средний подъем сваи от действия сил морозного пучения с учетом влияния соседних свай вычисляется по формуле

$$h_c = h_f^{np2} \left( 1 - \frac{F_z^{пред}}{F_z^0} \right) = 0,03 \left( 1 - \frac{238,9}{254,7} \right) \approx 0,00186 \text{ м.}$$

Удерживающая сваю сила

$$F_z^{пред} = [Q_g + 2|Q_z|(l - d_f) + F_n \cdot 2\pi \cdot R_d \cdot \text{tg}\alpha] = \\ = [9,41 + 2 \cdot 54,3(3 - 1,36) + 468 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 0,22 \cdot 0,0794] = 238,9 \text{ кН};$$

$$Q_{zi} = \pi f_{cp} \left( \frac{1}{R} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{2}{a_j} \right)^{-1} = 3,14 \cdot 13 \left( \frac{2}{0,19} - \frac{2}{0,9} + \frac{2}{0,9} + \frac{2}{1,273} \right)^{-1} = -54,3 \text{ кН};$$

$$F_n = -2G \cdot h_f = -2 \cdot 2600 \cdot 0,09 = -468 \text{ кН/м};$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} = \frac{6,5}{2(1 + 0,25)} = 2,6 \text{ МПа} = 2600 \text{ кН/м}^2.$$

Сила морозного пучения, действующая на сваю и определенная при условии, что глубина смерзания пучинистого грунта с поверхностью сваи равна глубине промерзания  $d_f$ , определяется по формуле

$$F_z^{0\max} = 8R \cdot G \cdot d_f \{ b \cdot \beta [k_0 \cdot R \cdot \beta + k_1 \cdot 2(1 - \nu)] + d \cdot \beta \cdot k_1 \} \frac{\pi^2}{8} = \\ = 8 \cdot 0,22 \cdot 2600 \cdot 1,36 \{ -0,01337 \cdot 2,3088 [0,91224 \cdot 0,22 \cdot 2,3088 + \\ + 1,6277 \cdot 2(1 - 0,25)] + 0,04389 \cdot 2,3088 \cdot 1,6277 \} \frac{3,14^2}{8} = 577,3 \text{ кН};$$

$$F = \frac{2h_f^{np1}}{\pi} = \frac{2 \cdot 0,045}{3,14} = 0,029 \text{ м};$$

$$\beta = \frac{\pi}{d_f} = \frac{3,14}{1,36} = 2,3088 \text{ м}^{-1};$$

$$B^r = 4(1 - \nu)k_1 + k_0 \cdot \beta \cdot R = 4(1 - 0,25) \cdot 1,6277 + 0,91224 \cdot 2,3088 \cdot 0,22 = 5,3465;$$

$$B^z = \beta \cdot R \cdot k_1 = 2,3088 \cdot 0,22 \cdot 1,6277 = 0,8268.$$

Значения функции Макдональда определяем интерполяцией в соответствии с табл. 1.

Таблица 1

Значения функции Макдональда

$x$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,5	2,0	2,5
$K_0(x)$	2,427	1,752	1,372	1,114	0,924	0,777	0,66	0,565	0,486	0,421	0,213	0,113	0,062
$K_1(x)$	9,853	4,775	3,055	2,184	1,656	1,302	1,05	0,861	0,716	0,601	0,277	0,139	0,073

$$\beta \cdot R = 2,3088 \cdot 0,22 = 0,508;$$

$$k_0 = k_0(\beta \cdot R) = 0,91224;$$

$$k_1 = k_1(\beta \cdot R) = 1,6277;$$

$$D^r = k_1 = 1,6277;$$

$$D^z = k_0 = 0,91224;$$

$$\Delta = B^r \cdot D^z - B^z \cdot D^r = 5,3465 \cdot 0,91224 - 0,8268 \cdot 1,6277 = 3,5315;$$

$$\Delta_B = -F \cdot D^r = -0,029 \cdot 1,6277 = -0,0472 \text{ м};$$

$$\Delta_d = F \cdot B^r = 0,029 \cdot 5,3465 = 0,155 \text{ м};$$

$$b = \frac{\Delta_B}{\Delta} = \frac{-0,0472}{3,5315} = -0,01337 \text{ м};$$

$$d = \frac{\Delta_d}{\Delta} = \frac{0,155}{3,5315} = 0,04389 \text{ м}.$$

Однако, согласно экспериментальным исследованиям, средняя действительная глубина смерзания грунта с поверхностью двуконусной сваи составляет  $d_f^1 \approx 0,6$  м, тогда в пределах данных частных условий справедливо

$$F_z^0 = \frac{F_z^{0\max}}{d_f} d_f^1 = \frac{577,3}{1,36} 0,6 = 254,7 \text{ кН}.$$

Отдельно заметим, что подъёму сваи препятствует действующая вниз сила  $P_\sigma$ , создаваемая нормальным давлением морозного пучения  $P_n$ , действующим перпендикулярно наклонной грани верхнего конуса сваи,

$$P_\sigma = -2\pi R \cdot G \cdot h_f \cdot \text{tg}\alpha,$$

где  $R_{\text{ср}}$  - осредненный в пределах глубины промерзания грунта радиус двуконусной сваи;  $h_f$  - подъём свободной поверхности грунта;  $G$  - модуль сдвига мёрзлого грунта;  $\alpha$  - угол между гранью верхнего конуса и осью сваи;  $E$  - модуль деформации грунта;  $\nu$  - коэффициент Пуассона грунта.

Рассчитаем величину этой силы с использованием исходных данных:

$$P_\sigma \approx -2 \cdot 3,14 \cdot 0,25 \cdot 2600 \cdot 0,09 \cdot 0,0794 = -2,92 \cdot 10^4 \text{ Н}.$$



Таким образом, величина силы  $P_{\sigma}$ , препятствующей подъему сваи в конкретных грунтово-геологических и климатических условиях, составляет 23 % от расчетной несущей способности сваи.

Сравним результаты, полученные аналитическим путём, с экспериментальными данными. Значения показателей сводим в табл. 2.

**Таблица 2**

**Результаты сравнения данных, полученных аналитическим и экспериментальным путем**

№ п/п	Наименование сравниваемых показателей	Результаты		
		эксперимент	аналитические	% к эксперименту
1	Средний подъем сваи в составе куста от действия сил морозного пучения за период 2005/2006 гг., м	0,012	0,014	+13
2	Средний подъем сваи в составе куста от действия сил морозного пучения за период 2010/2011 гг., м	0,015	0,0186	+24
3	При заполнении щели гравием	0,0001	0,00012	0

**Основные выводы**

1. Для борьбы с морозным пучением применен конструктивный способ борьбы, основанный на использовании объемных сил расширения грунта при промерзании. Верхние замерзшие слои грунта будут оказывать сопротивление подъему сваи.

2. Данный вид сваи рекомендуется использовать не только для обустройства фундаментов нефтедобывающих установок, но также и для возведения фундамента малонагруженных, неотапливаемых зданий и сооружений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 42234 РФ, МПК7 Е 02 D 5/30. Свая/Б.С. Юшков, А.О. Добрынин, Д.С. Репецкий (Россия). —№2004121946/22; Заявл. 20.07.2004; Опубл. 27.11.2004. - Бюл. № 33; Приоритет 20.07.2004.
2. Репецкий Д. С. Исследование взаимодействия маломасштабных двухконусных свай с окружающим глинистым грунтом // Материалы Междунар. науч.-техн. конф.: Сб.науч.тр. /ПГТУ. - Пермь, 2008.- С. 180–186.
3. Юшков Б.С., Ротт И.В. О строительстве зданий на пучинистых грунтах // В сборнике научных трудов «Повышение эффективности и качества устройства оснований в условиях нечерноземной зоны» РСФСР. Владимир. 1986.
4. Юшков Б.С., Пономарев А.Б. Применение пустотелых конических свай в гражданском строительстве // В сборнике научных трудов «Основания и фундаменты в геологических условиях Урала». РИО. ППИ. Пермь. 1987.
5. Юшков Б.С., Пономарев А.Б. Фундаменты из полых конических свай // В трудах II Всесоюзной конференции по проблемам свайного фундаментостроения. Одесса. 1990.
6. Юшков Б.С., Кузнецов Г.Б. Прикладные уравнения ползучести и длительной прочности грунтов, учитывающие скорость нагружения, получаемые на основе дробно-линейного ядра ползучести // В трудах международной научно-практической конференции по проблемам механики грунтов, фундаментостроению и транспортному строительству. Том I, Пермь. 2004.
7. Юшков Б.С., Репецкий Д.С. Сваи для промерзающих грунтов // Жилищное строительство. Москва. Издательство Ладья, 2004.
8. Юшков Б.С., Афонасьев И.А., Репецкий Д.С. Криогенные процессы в основании дорог // В трудах международной научно-практической конференции Российской Академии транспорта «Актуальные проблемы автомобильного, железнодорожного и трубопроводного транспорта в Уральском Регионе». Пермь 2005.
9. Юшков Б.С., Афонасьев И.А., Минзуренко А.А. Механизм переноса влаги и пара в капиллярно-глинистых грунтах // В сборнике трудов конференции «Современное состояние и инновации транспортного комплекса». Пермь, 2008.
10. Юшков Б.С., Бургунутдинов А.М. Учет морозобойных трещин при строительстве трубопроводов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе № 7. Москва 2011.
11. Bartolomey A., Goncharov B., Omelchak I., Abbasov P. Efficient technology in pile foundation engineering // Proc. Twelfth Intern. Conf on Soil Mech. And Found. Eng. Brazil, Rio De janeiro, 1989.

**Рецензент:** Заместитель Председателя Поволжского отделения Российской академии транспорта, академик РАТ, доктор технических наук, профессор Овчинников Игорь Георгиевич.

**Boris Yushkov**

State National Research Politechnical University of Perm  
Russia, Perm  
E-Mail: [adf@pstu.ru](mailto:adf@pstu.ru)

## Oil Well Foundation Consolidation

**Abstract:** This paper reviews the oil well foundation consolidation in seasonally freezing soils. In freezing the saturated clay soils increase their volume and uplift the driven prismatic piles. The non-uniform pile uplifting cripples the foundation and results in oil well damage and oil spill on the soil surface. This paper proposes a new design of tapered piles having two tapers: the top and the bottom ones. The top taper prevents from pile uplifting under the frost heaving forces. The structural analysis of a pile in the pile group considering the frost zone and the frost heaving action is given in this paper.

**Keywords:** foundation; two-taper piles; experiment; structural analysis; clay soil; shearing stress; friction forces; consolidation.

### REFERENCES

1. Pat. 42234 RF, MPK7 E 02 D 5/30. Svaja/B.S. Jushkov, A.O. Dobrynin, D.S. Repeckij (Rossija). — №2004121946/22; Zajavl. 20.07.2004; Opubl. 27.11.2004. - Bjul. № 33; Prioritet 20.07.2004.
2. Repeckij D. S. Issledovanie vzaimodejstvija malomashtabnyh dvuhkonusnyh svaj s okruzhajushhim glinistym gruntom // Materialy Mezhdunar. nauch.-tehn. konf.: Sb.nauch.tr. /PGTU. - Perm', 2008.- S. 180–186.
3. Jushkov B.S., Rott I.V. O stroitel'stve zdaniy na puchinistyh gruntah // V sbornike nauchnyh trudov «Povyshenie jeffektivnosti i kachestva ustrojstva osnovanij v uslovijah nechernozemnoj zony» RSFSR. Vladimir. 1986.
4. Jushkov B.S., Ponomarev A.B. Primenenie pustotelyh konicheskikh svaj v grazhdanskom stroitel'stve // V sbornike nauchnyh trudov «Osnovaniya i fundamenty v geologicheskikh uslovijah Urala». RIO. PPI. Perm'. 1987.
5. Jushkov B.S., Ponomarev A.B. Fundamenty iz polyh konicheskikh svaj // V trudah II Vsesojuznoj konferencii po problemam svajnoho fundamentostroenija. Odessa. 1990.
6. Jushkov B.S., Kuznecov G.B. Prikladnye uravnenija polzuchesti i dlitel'noj prochnosti gruntov, uchityvajushhie skorost' nagruzhenija, poluchaemye na osnove drobnolijnogo jadra polzuchesti // V trudah mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii po problemam mehaniki gruntov, fundamentostroeniju i transportnomu stroitel'stvu. Tom I, Perm'. 2004.
7. Jushkov B.S., Repeckij D.S. Svai dlja promerzajushhih gruntov // Zhilishhnoe stroitel'stvo. Moskva. Izdatel'stvo Lad'e, 2004.

8. Jushkov B.S., Afonas'ev I.A., Repeckij D.S. Kriogennye processy v osnovanii dorog // V trudah mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii Rossijskoj Akademii transporta «Aktual'nye problemy avtomobil'nogo, zheleznodorozhnogo i truboprovodnogo transporta v Ural'skom Regione». Perm' 2005.
9. Jushkov B.S., Afonas'ev I.A., Minzurenko A.A. Mehanizm perenosa vlagi i para v kapilljarno-glinistyh gruntah // V sbornike trudov konferencii «Sovremennoe sostojanie i innovacii transportnogo kompleksa». Perm', 2008.
10. Jushkov B.S., Burgonutdinov A.M. Uchet morozobojnyh treshhin pri stroitel'stve truboprovodov // Zashhita okruzhajushhej sredy v neftegazovom komplekse № 7. Moskva 2011.
11. Bartolomey A., Goncharov B., Omelchak I., Abbasov P. Efficient technology in pile foundation engineering // Proc. Twelfth Intern. Conf on Soil Mech. And Found. Eng. Brazil, Rio De janeiro, 1989.